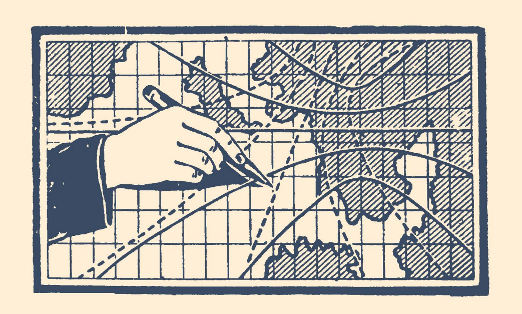


М. И. ФИНКЕЛЬШТЕЙН
и
А. Н. ШУСТЕРОВИЧ

РАДИОНАВИГАЦИЯ



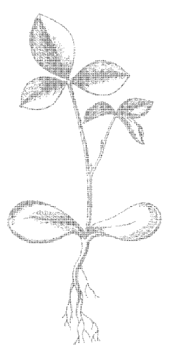


МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 150

М. И. ФИНКЕЛЬШТЕЙН
и
А. Н. ШУСТЕРОВИЧ

РАДИОНАВИГАЦИЯ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

52292

В брошюре излагаются основные принципы работы различных радионавигационных установок и систем. Она рассчитана на широкие круги радиолюбителей, но может быть полезной для всех интересующихся этой областью современной радиотехники.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
Развитие радионавигации в СССР 5
Некоторые вопросы распространения радиоволн 8
Радиопеленгаторы 10
  Антенные устройства радиопеленгаторов 11
  Слуховые радиопеленгаторы 20
  Самолетные радиопеленгаторы 27
  Радиопеленгатор с электронно-лучевой трубкой 36
  Ошибки радиопеленгаторов 40
Радиомаяки 40
  Равносигнальные радиомаяки 41
  Всенаправленные радиомаяки 43
Дальномерные системы 51
  Импульсная круговая система 52
  Импульсная гиперболическая система 55
  Фазовые системы 63
Радиовысотомер 68
Слепая посадка самолета 72
  Слепая посадка по радиомаякам 73
  Слепая посадка самолета с помощью радиолокационных станций 76
Использование телевидения в радионавигации 78
Заключение 80

Редактор *Привальский Е. М,* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 28/II 1952 г. Подписано к печати 17/IX 1952 г.
Бумага $84 \times 108^1/_{32} = 1^1/_4$ бумажных — 4,10 п. л. Уч.-изд. л. 4,5
Т-07076 Тираж 15 000 экз. Зак. № 3099
Цена 1 р. 80 к. (номинал по прейскуранту 1952 г.)

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Навигация — наука о вождении кораблей — возникла еще в древности. В те времена для определения места корабля пользовались береговыми ориентирами, а также положением небесных светил. Однако плавание кораблей на большие расстояния от берегов стало возможным лишь после появления некоторых навигационных приборов, в особенности магнитного компаса.

Магнитный компас, как известно, позволяет определить угол между меридианом, проходящим через корабль, и направлением оси корабля. Имея на борту компас и прибор, показывающий пройденное расстояние (лаг), можно приближенно вычислить местоположение корабля. Но течение и ветры настолько нарушают эти расчеты, что иногда в сильную непогоду можно полностью потерять ориентировку.

Значительно точнее определяется местоположение с помощью небесных светил, позволяющих вычислить географические координаты — широту и долготу. Широта определяется по высоте светил над горизонтом, а долгота — по моменту времени прохождения светила через меридиан данного места. Для этой цели используются секстант и хронометр, сохраняющий длительное время верность хода.

Все же хронометр требует периодической проверки. Эта задача стала выполняться сравнительно просто с появлением радио: радиостанции в определенные часы передают сигналы точного времени. Служба времени — одно из первых применений радио в навигации.

Вождение самолетов (аэронавигация) принципиально решается теми же способами, что и вождение кораблей. На самолете имеются: магнитный компас, указатель воздушной скорости, часы и другие приборы. Имеются также приборы для астрономической ориентировки.

Но перечисленные навигационные приборы (кроме астрономических) не позволяют восстановить место корабля

или самолета, а для ориентировки по солнцу и звездам требуется хорошая погода. Быстро восстановить потерянную ориентировку позволяет только радио. Вождение кораблей и самолетов с помощью радиосредств называется *радионавигацией.*

Радионавигация является часто единственным средством навигации в сложных метеорологических условиях. При благоприятной погоде радионавигационные установки значительно облегчают самолето- и кораблевождение, позволяют безопасно водить корабли и самолеты на многие тысячи километров. Остановимся коротко на важнейших задачах, решаемых радионавигацией.

Основная задача радионавигации — определение места корабля или самолета в данный момент времени. Зная, где расположен корабль в данный момент и учитывая течение, ветер и другие навигационные элементы, штурман может сделать необходимые выводы о дальнейшем следовании корабля или самолета.

Определяя координаты с помощью радиосредств, можно также вести контроль пути. Особенно важным является такой контроль при плавании в открытом море или при полете над местностью, не имеющей характерных ориентиров, например над степью, пустыней, лесными массивами, морем и т. п.

Однако на практике не всегда требуется вести самолет по строго определенному маршруту. Иногда важным является только конечный пункт полета, например аэродром. В этом случае привести самолет в заданный пункт можно с помощью так называемого радиокомпаса. Так, вылетая из Москвы и настраивая радиокомпас, например, на Мурманскую радиостанцию, можно совершить слепой полет Москва — Мурманск.

В темную полярную ночь с помощью того же прибора самолет может безошибочно отыскать маленький островок, затерянный среди необъятных просторов Ледовитого океана, и вернуться обратно на материк. Вождение по радиокомпасу исключительно просто: надо вести самолет так, чтобы стрелка радиокомпаса на шкале указывала нулевое деление, и тогда самолет при любом ветре выйдет на радиостанцию.

С помощью радиосредств решается в настоящее время и другая очень важная для авиации задача — слепая посадка самолета, т. е. посадка в условиях, когда пилот не видит

аэродрома. Надежная система слепой посадки значительно повышает безопасность полетов, позволяя летать почти в любую погоду.

Упомянутые задачи радионавигации решаются с помощью различных радионавигационных систем, которые представляют собой комплекс самолетного, корабельного и наземного радиооборудования. Эти системы можно разбить на три группы, отличающиеся друг от друга характером измеряемых величин: угломерные, дальномерные и смешанные.

В угломерных системах определяется направление на работающую радиостанцию, чаще всего в горизонтальной плоскости. Оно задается углом между каким-либо известным направлением (например, направлением меридиана) и направлением на радиостанцию. Этот угол называется радиопеленгом, а его отыскание называется радиопеленгованием. Радиопеленги определяются с помощью радиопеленгаторов и радиомаяков.

Радиопеленгатор представляет собой специальное приемное устройство, служащее для определения направления на обычный радиопередатчик.

Радиомаяк представляет собой передающую радиостанцию с известным географическим положением, излучающую специальные сигналы, по которым можно определить направление на радиомаяк.

В дальномерных системах в отличие от угломерных определяется не угол, а расстояние до радиостанции или же разность расстояний до двух радиостанций.

В смешанных системах измеряются обе величины: угол и расстояние. Примером смешанных систем являются радиолокационные станции.

РАЗВИТИЕ РАДИОНАВИГАЦИИ В СССР

57 лет прошло с того знаменательного дня, когда великий русский ученый Александр Степанович Попов демонстрировал свои первые опыты по радиосвязи.

С тех пор радиотехника проникла почти во все отрасли народного хозяйства и военного дела. Особую роль играют две такие большие и важные области радиотехники, как радиолокация и радионавигация, которые также связаны с именем А. С. Попова.

Известно, например, что в 1897 г. во время опытов, проводившихся на Балтийском море, А. С. Попов обнаружил отражение радиоволн от корабля. Это явление легло в основу современной радиолокации.

В том же 1897 г. А. С. Попов предложил использовать радиоволны для вождения кораблей. Он писал: «Применение источника электромагнитных волн на маяках в добавление к световому или звуковому сигналам может сделать видимыми маяки в тумане и в бурную погоду: прибор, обнаруживающий электромагнитную волну, звонком может предупредить о близости маяка, а промежутки между звонками дадут возможность различать маяки.

Направление маяка может быть приблизительно определено, пользуясь свойством мачт, снастей задерживать электромагнитную волну, так сказать затенять ее».

В этих словах заложены мысли, которыми пользовались ученые, решавшие впоследствии задачи радиопеленгования.

Знаменитый русский флотоводец адмирал С. О. Макаров, один из первых оценивший возможности гениального открытия А. С. Попова, в приказе от 7 марта 1904 г. (периода русско-японской войны) писал: «При определении направления можно пользоваться, поворачивая свое судно и заслоняя своим рангоутом приемный провод, причем по отчетливости можно судить иногда о направлении на неприятеля. Минным офицерам предлагается провести в этом направлении всякие опыты».

В дальнейшем русские исследователи развивали и совершенствовали радионавигацию. Через несколько лет после открытия А. С. Попова русский моряк А. Щенснович разработал очень остроумную радионавигационную систему. Радиосигнал с корабля принимался на маяке. В момент приема на маяке запускался звуковой подводный передатчик, сигнал которого приходил на корабль. По интервалу времени между подачей радиосигнала с корабля и приемом пришедшего на корабль звукового сигнала с маяка определялось расстояние между кораблем и маяком.

Вслед за методом, который был предложен А. С. Поповым и осуществлен С. О. Макаровым, появились новые методы радиопеленгования, уже не связанные с необходимостью поворачивать корабль. Для этой цели начали применять специальные поворотные антенны направленного действия.

Радиопеленгование весьма успешно использовалось во время первой мировой войны. Например, на Балтийском море была оборудована целая сеть пеленгаторных станций, которые давали возможность определить местоположение радиостанций противника. Это была заслуга русских инженеров и ученых.

Правящие круги царской России стесняли передовую мысль и всячески тормозили технический прогресс. Лишь Великая Октябрьская социалистическая революция открыла большие возможности для творческой работы. Началось широкое внедрение радиотехники в морскую и воздушную навигацию.

Уже в 1917—1918 гг. в Ленинградском политехническом институте было сделано несколько предложений по конструкции радиомаяков. В дальнейшем советские ученые и инженеры создавали самые совершенные радиомаяки. Так, в 30-х годах Л. Е. Штиллерман и другие советские инженеры разработали различные типы радиомаяков, опередив на несколько лет аналогичные разработки в Германии и Англии.

Развитие советской радиотехники позволило создать принципиально новые дальномерные радионавигационные системы, основанные на классических трудах академиков Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси по определению скорости распространения радиоволн вдоль земной поверхности. Советские ученые предложили оригинальные приборы для измерения расстояния, основанные на интерференции радиоволн («фазовый зонд», радиолаг, радиодальномер). Эти приборы нашли широкое практическое применение. Например, радиоинтерференционный дальномер «МПЩ» (конструкции академиков Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси и проф. Е. Я. Щеголева) использовался при гидрографических промерах моря, в опытных геодезических работах и т. д.

Идея прибора «фазовый зонд», предложенного и осуществленного советскими учеными в 1936 г., была заимствована в 1946 г. англичанами в их радионавигационной системе «Декка».

В 30-х годах наряду с широким использованием радиомаяков появились самолетные пеленгаторы-радиополукомпасы. В этой области также успешно работали советские инженеры и конструкторы, значительно усовершенствовавшие такого рода приборы.

Кроме указанных радионавигационных средств, начиная с 20-х годов, широко применялись и применяются до сего

времени наземные пеленгаторы различных типов. Ряд типов пеленгаторов, а также методика расчета и анализа точности их впервые предложены проф. В. В. Ширковым.

Радионавигация нашла широкое применение во время Великой Отечественной войны и помогла нашей авиации и флоту громить врага.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Напомним читателю некоторые особенности распространения радиоволн.

Как известно, всякий проводник, по которому протекает переменный электрический ток, создает вокруг себя электрическое и магнитное поля. Часть энергии этих полей непрерывно удаляется от проводника со скоростью света. Появляется электромагнитная волна. Электромагнитная волна характеризуется векторами напряженности электрического и магнитного полей E и H. Эти векторы в пространстве всегда перпендикулярны. Вектор напряженности электрического поля E может быть различным образом расположен относительно земли. Если он располагается вертикально, то электромагнитная волна (радиоволна) называется вертикально поляризованной; если вектор E параллелен земле, то волна называется горизонтально поляризованной.

Тип поляризации волны, в основном, определяется устройством и расположением антенны. Так, например, вертикальная антенна создает вблизи земли приблизительно вертикально поляризованную волну [1]; антенна в виде горизонтального провода — горизонтально поляризованную волну.

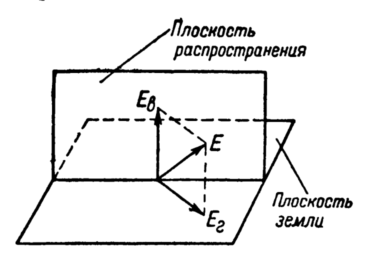
Электромагнитная волна, встречая на своем пути приемные антенны, вызывает в них э. д. с. Величина наводимых э. д. с. зависит от того, как расположена антенна относительно вектора напряженности электрического поля. Так, например, в горизонтальном проводе вертикально поляризованная волна э. д. с. не наводит, но она наводит э. д. с. в вертикальном проводе.

Часто наблюдается более сложный случай поляризации. Радиолюбителям хорошо известно, что при распространении радиоволн, особенно коротких, важную роль играют ионизированные слои атмосферы, расположенные на высоте 50—

---

[1] Речь идет о поверхностной волне.

400 *км* над землей. В этих слоях имеются свободные заряды — электроны и ионы, вследствие чего проходящие здесь радиоволны отражаются и преломляются. Благодаря влиянию магнитного поля земли на свободные электроны поляризация отраженной волны меняется. При этом вектор электрического поля оказывается расположенным под углом к земле и не лежит в плоскости распространения [1]. Вектор *E* можно разложить по правилу параллелограмма на две составляющие: вертикальную и горизонтальную (фиг. 1). Ниже будет показано, что полезной для радиопеленгования является лишь вертикальная составляющая.



Фиг. 1. Электрическое поле пространственной волны.

Радиоволны могут распространяться над землей двояко: вдоль поверхности земли и путем отражения от ионизированных слоев (земной луч и пространственный луч).

Радиоволны различных диапазонов обладают различными свойствами при распространении. Волны длинноволнового диапазона хорошо распространяются земным лучом и обладают, кроме того, свойством огибать препятствия и распространяться далеко за линию горизонта (явление диффракции). Пространственный луч в этом диапазоне также существует, но начинает сказываться только на больших расстояниях.

Волны средневолнового диапазона распространяются земным лучом на меньшее расстояние, чем длинные волны (при той же мощности излучения), а способность огибать земную поверхность выражена у них слабее. Пространственный луч днем поглощается ионизированным слоем и наблюдается только ночью, причем начиная с расстояний 60—100 *км* от радиостанции влияние его довольно значительно.

Короткие и промежуточные волны распространяются земным лучом на сравнительно небольшие расстояния (несколько десятков километров). Диффракция выражена еще слабее, чем у средних волн. Пространственный луч возвращается на землю не всегда, а только в тех случаях, когда

---

[1] Плоскостью распространения называется вертикальная плоскость, проходящая через направление распространения радиоволны.

волна распространяется под сравнительно небольшим углом к горизонту. Если же этот угол больше некоторого критического значения, то волна от ионизированного слоя не отражается, а пронизывая его, уходит в межпланетное пространство. Для коротких волн характерны так называемые «мертвые зоны», куда не достигает ни земной луч, ни пространственный.

Ультракороткие волны земным лучом распространяются на очень малые расстояния. Способность к огибанию также невелика. Ультракороткие волны от ионизированных слоев не отражаются, а пронизывают их при любом угле падения. Следовательно, принять волну можно только в том случае, если передающая и приемные антенны находятся на одной прямой линии. Если приемная антенна находится за горизонтом, то земля затеняет приемную антенну, и прием отсутствует. Минимальное расстояние, при котором земля начинает затенять антенну, называется дальностью прямой видимости. Таким образом, дальность действия радиостанции на УКВ ограничивается дальностью прямой видимости, которая зависит от высоты передающей и приемной антенн.

Однако теория и опыт показывают, что на распространение УКВ значительное влияние оказывает атмосфера, благодаря чему земной луч может проникнуть также за горизонт (явление рефракции). Соответственно этому дальность действия радиостанции может увеличиться на 15—20%. При некоторых атмосферных условиях дальность распространения УКВ увеличивается более значительно (явление сверхрефракции).

Особенности распространения УКВ были исследованы впервые в СССР акад. Б. А. Введенским, проф. А. Г. Аренбергом и др. За строгое математическое решение задачи диффракции радиоволн вокруг земной поверхности акад. В. А. Фоку в 1945 г. была присуждена Сталинская премия первой степени.

Познакомимся теперь с принципом действия различных радионавигационных установок.

РАДИОПЕЛЕНГАТОРЫ

Радиопеленгатором, как уже отмечалось выше, называется приемное устройство, служащее для определения направления на работающий радиопередатчик. Существуют различные типы радиопеленгаторов. Все они состоят из сле-

дующих основных частей: антенного устройства, устройства отсчета направления на радиостанцию, приемника, индикатора.

Основным элементом радиопеленгатора является антенное устройство. В разных радиопеленгаторах оно может быть различным, но всегда сохраняется одно общее свойство, а именно направленное действие, т. е. величина наведенной э. д. с. зависит от направления приходящих радиоволн. Это свойство и используется для определения направления на радиопередатчик. Отсчет направления производится с помощью устройства отсчета, а индикатор показывает момент, когда нужно произвести этот отсчет. Приемник, как обычно, используется для усиления принятых колебаний.

Например, простейший слуховой радиопеленгатор с поворотной рамкой состоит из поворотной рамочной антенны (обладающей, как будет показано ниже, направленным действием), лимба для отсчета углов поворота рамки, приемника и телефонов. Более сложные типы радиопеленгаторов имеют другие антенны, устройства отсчета и другие индикаторы; могут несколько отличаться и приемники. Например, в качестве индикатора вместо телефонов используется иногда электронно-лучевая трубка; в некоторых случаях устройство отсчета и индикатор представляют собой один стрелочный прибор и т. д.

Радиопеленгаторы различают также по месту установки. Соответственно бывают наземные, корабельные и самолетные радиопеленгаторы. Чтобы понять их работу, прежде всего нужно ознакомиться с принципом действия и устройством антенн.

АНТЕННЫЕ УСТРОЙСТВА РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ

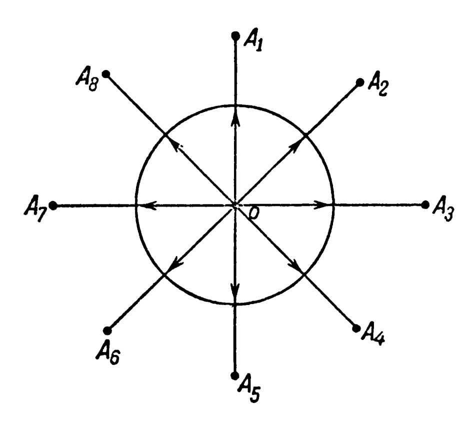
В качестве направленных антенн в радиопеленгаторах используются: две вертикальные разнесенные антенны, рамочные антенны, Н-образные антенны и вертикальная антенна в комбинации с направленными антеннами.

Простейшей антенной, используемой в радиотехнике, является вертикальная заземленная антенна. Особенностью ее является отсутствие направленности в горизонтальной плоскости.

Для характеристики направленных свойств антенны пользуются специальными кривыми, которые называются диаграммами направленности. Эти кривые дают графическую

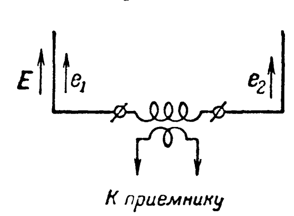
зависимость величины э. д. с. в антенне от изменения угла между заранее выбранным направлением и направлением на передающую радиостанцию.

Допустим, в точке O (фиг. 2) находится вертикальная приемная антенна, вокруг нее в разных точках на одинаковых расстояниях (A_1, A_2, A_3 ... A_8) расположены радиопередатчики одной и той же мощности. В этом случае э. д. с. в антенне при работе каждого передатчика в отдельности будет одинаковой, и величину ее можно представить в виде отрезков, одинаковых по величине и направленных в ту сторону, откуда поступают сигналы. Соединив концы отрезков плавной линией, получим окружность, которая и будет являться диаграммой направленности вертикальной антенны в горизонтальной плоскости.



Фиг. 2. Диаграмма направленности вертикальной антенны.

По аналогии с диаграммой направленности приемной антенны определяется диаграмма направленности передающей антенны. Разница лишь в том, что вместо отрезков, характеризующих силу приема в разных направлениях, откладываются отрезки, характеризующие интенсивность излучения.

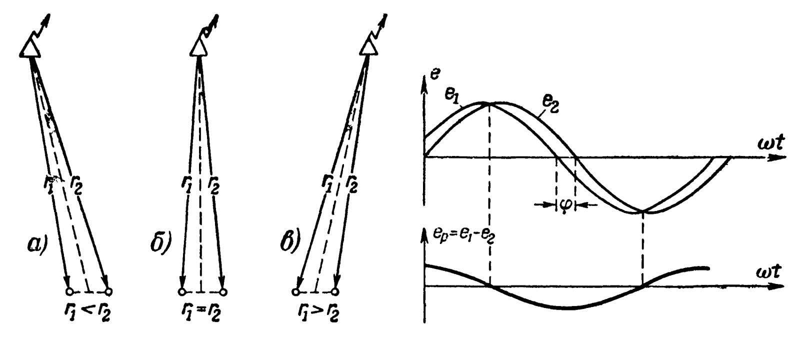


Фиг. 3. Вертикальные разнесенные антенны.

Так как вертикальная антенна не имеет направленных свойств в горизонтальной плоскости, то ее нельзя самостоятельно использовать для радиопеленгования. Для обеспечения направленного приема в радиопеленгаторах часто применяют систему из двух вертикальных разнесенных антенн. Антенны располагаются на определенном расстоянии друг от друга и включаются навстречу с помощью горизонтальных проводников (фиг. 3). Обычно расстояние

между антеннами гораздо меньше длины волны принимаемых колебаний. Рассмотрим величину э. д. с., действующей на входе приемника, когда изменяется направление приходящей вертикально поляризованной волны. Электромагнитная волна наводит в антеннах э. д. с. e_1 и e_2, которые действуют навстречу. Поэтому результирующая э. д. с. на входе приемника $e_p = e_1 - e_2$.

Если направление на радиопередатчик перпендикулярно плоскости антенн, то расстояния от передатчика до антенн будут одинаковыми (фиг. 4,*б*). Поэтому радиоволна одновременно пересекает обе антенны и, следовательно, э. д. с. e_1 и e_2 будут совпадать как по амплитуде, так и по фазе,



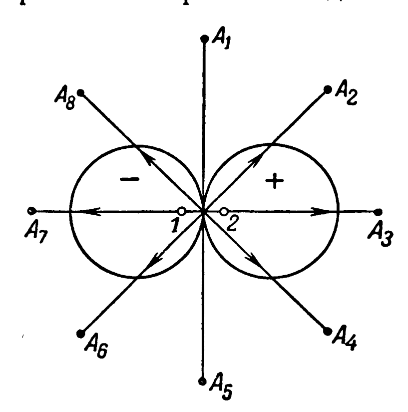
Фиг. 4. Прием на две вертикальные разнесенные антенны.

Фиг. 5. Электродвижущие силы вертикальных разнесенных антенн

и результирующая э. д. с. $e_p = e_1 - e_2 = 0$. Если же направление приходящей волны не перпендикулярно плоскости антенн (фиг. 4,*а* и 4,*в*) и, следовательно, расстояния от передатчика до обеих антенн будут различны, волна сперва пересекает одну антенну, а затем — другую. Вследствие ничтожной разницы в расстоянии амплитуды наведенных э. д. с. e_1 и e_2 можно считать равными, но между этими э. д. с. возникает сдвиг фаз, который и вызывает появление результирующей э. д. с. Электродвижущие силы e_1 и e_2 изображены графически на фиг. 5. Чтобы определить результирующую э. д. с. e_p, следует вычесть из ординат кривой e_1 ординаты кривой e_2 (учитывая при этом знаки). После вычитания получим кривую $e_n = e_1 - e_2$.

Амплитуда результирующей э. д. с. e_p, как видно из фиг. 5, зависит от сдвига фаз φ между e_1 и e_2: чем больше сдвиг фаз, тем амплитуда больше. В свою очередь, сдвиг

фаз зависит от расположения плоскости антенн относительно направления на радиопередатчик: чем ближе направление на радиопередатчик к плоскости антенн, тем больше сдвиг фаз. Когда направление на радиопередатчик лежит в плоскости антенн, амплитуда результирующей э. д. с. будет наибольшей. Такая зависимость имеется лишь при небольшом в сравнении с длиной волны расстоянии между проводами антенн (как в рассматриваемом случае). Когда это расстояние сравнимо с длиной волны, то увеличение сдвига фаз может привести к уменьшению амплитуды результирующей э. д. с., и наоборот.



Фиг. 6. Диаграмма направленности двух вертикальных разнесенных антенн в горизонтальной плоскости.

Построим теперь диаграмму направленности системы из двух вертикальных разнесенных антенн. Поступаем точно так же, как при построении диаграммы направленности вертикальной антенны, т. е. мысленно располагаем в разных направлениях радиопередатчики и определяем результирующую э. д. с. при работе этих передатчиков. Из сказанного выше ясно, что при работе передатчиков A_3 и A_7 (фиг. 6) э. д. с. будет наибольшей, а при работе передатчиков A_1 и A_5 — равной нулю. Если изобразить величину э. д. с. соответствующим отрезком и соединить концы отрезков плавной кривой, получим так называемую восьмерку (две касающихся окружности) [1]. Эта диаграмма направленности характерна тем, что имеет два направления нулевого приема, перпендикулярных плоскости антенн, и два направления максимального приема, совпадающих с плоскостью антенн. Минимумы восьмерочной диаграммы выражены резко, т. е. при небольшом отклонении от направления нулевого приема сила приема резко возрастает. Максимумы же диаграммы расплывчатые, т. е. сила приема мало меняется даже при сравнительно большом отклонении от направления макси-

[1] Если расстояние между антеннами сравнимо с длиной волны, диаграмма направленности приобретает более сложный вид.

мума. Следует обратить внимание на знаки + и — на фиг. 6. Они расставлены произвольно, но характеризуют изменения фазы результирующей э. д. с. на 180° при переходе через линию A_1, A_5. Это обстоятельство легко понять, рассматривая фиг. 6. При работе передатчиков A_2, A_3, A_4 э. д. с. в антенне *2* опережает по фазе э. д. с. в антенне *1*. Если же работают передатчики A_6, A_7, A_8, то — наоборот. Следовательно, фазы результирующих э. д. с. будут в этих случаях противоположными.

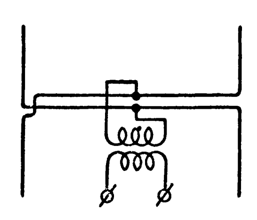
Таким образом, система из двух вертикальных разнесенных антенн в отличие от одной вертикальной антенны может быть использована для нахождения направления на радиопередатчик. Это можно, например, сделать путем поворота антенной системы и определения направления минимума приема.

Мы предполагали, что э. д. с. наводится волной, у которой электрическое поле вертикально. Иное, однако, получается при приеме пространственной волны, отраженной от ионизированного слоя. Электрическое поле такой волны располагается не вертикально и, следовательно, имеет не только вертикальную, но и горизонтальную составляющую (фиг. 1), которая наводит э. д. с. в горизонтальных частях антенны. Это обстоятельство приводит к изменению направления нулевого приема.

В самом деле, если плоскость антенн перпендикулярна к направлению на радиостанцию, то э. д. с., наводимые в вертикальных сторонах, совпадают по фазе, и результирующая э. д. с. равна нулю. Но одновременно за счет горизонтальной составляющей электрического поля наводится э. д. с. в горизонтальных частях антенны. Поэтому результирующее напряжение будет равно нулю при таком положении плоскости антенн относительно направления на радиостанцию, при котором э. д. с. вертикальных сторон компенсирует э. д. с. горизонтальных частей. Разумеется, радиостанция уже не будет находиться на перпендикуляре к плоскости антенн, т. е. изменится направление нулевого приема. Это явление носит название ночного эффекта, так как на средних волнах пространственная волна существует во время восхода и захода солнца и ночью.

На коротких волнах пространственная волна существует круглые сутки, и следовательно, ночной эффект будет проявляться также и днем. Ночной эффект является причиной ошибок при радиопеленговании. Для борьбы с ним исполь-

зуются антенны, у которых уничтожается прием на горизонтальные части. Подобная конструкция антенны приведена на фиг. 7. Четыре вертикальных провода соединены горизонтальным фидером. Расстояние между проводниками фидера выбирается много меньше, чем длина волны принимаемых колебаний. К фидеру в центральных точках подключается трансформатор, связывающий антенну с приемником. Приходящая пространственная волна наводит э. д. с. как в вертикальных, так и в горизонтальных частях. Прием на вертикальные части ничем не отличается от приема на две разнесенные вертикальные антенны, о котором рассказывалось ранее, и следовательно, диаграмма направленности представляет собой восьмерку. Прием на горизонтальные части имеет ту особенность, что э. д. с., наведенные в верхнем и нижнем проводниках, ввиду небольшого расстояния между проводниками всегда практически совпадают по фазе и равны по величине. Отсюда следует, что э. д. с. горизонтальных частей не создают разности потенциалов на входе первичной обмотки трансформатора связи, и таким образом, на его вторичной обмотке существует напряжение за счет приема только на вертикальные части. Рассматриваемая антенна имеет нормальную восьмерочную диаграмму направленности даже при приеме пространственной волны.

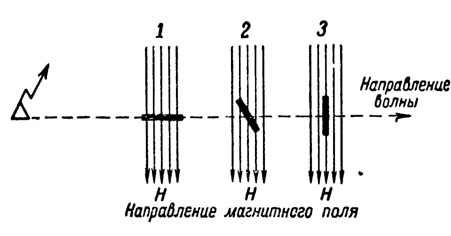


Фиг. 7. Н-образная антенна.

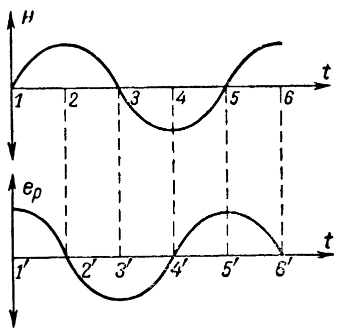
Если соединить верхние точки двух вертикальных разнесенных антенн горизонтальным проводником, то мы получим рамочную антенну. Такое дополнение не меняет свойств антенны, так как в случае вертикально поляризованной волны горизонтальный проводник не принимает. Поэтому прямоугольная рамочная антенна обладает всеми особенностями, которые были отмечены для системы из двух вертикальных разнесенных антенн, в частности имеет такую же диаграмму направленности.

Объясним работу рамочной антенны иным способом, который пригоден также для рамочных антенн любой формы. Пусть мы имеем вертикально расположенную рамку и пусть радиоволны имеют вертикальную поляризацию. Тогда линии магнитного поля лежат в горизонтальной плоскости и пронизывают плоскость вертикальной рамки (фиг. 8). Благодаря высокочастотному изменению магнитного потока, про-

низывающего рамку, в ней наводится э. д. с. той же частоты. Очевидно, что амплитуда этой э. д. с. зависит от числа магнитных силовых линий, пронизывающих плоскость рамки, т. е. зависит от расположения плоскости рамки относительно направления приходящей волны. Когда рамка находится в положении *1* (фиг. 8) ее пронизывает наибольшее число магнитных силовых линий, и поэтому наведенная э. д. с. наибольшая. В положении *2* число магнитных силовых линий меньше, а в положении *3* рамка вообще не пронизывается силовыми линиями, так что наведенная э. д. с. равна нулю.



Фиг. 8. Наведение э. д. с. в рамке (вид сверху) магнитным полем.



Фиг. 9. Магнитное поле и э. д. с. рамки.

Если направление распространения волны изменится на 180°, то фаза э. д. с. также должна измениться, ибо меняется направление магнитных силовых линий, входящих в рамку. Таким образом, диаграммой направленности рамочной антенны является уже знакомая нам восьмерка (фиг. 6).

Можно доказать, что э. д. с. рамки сдвинута по фазе на 90° относительно магнитного или электрического полей приходящей волны, т. е относительно э. д. с., которая наводилась бы в вертикальной антенне. На фиг. 9 показано, как изменяется магнитное поле волны, иначе говоря число магнитных силовых линий, пронизывающих рамку с течением времени. Так как наведенная в рамке э. д. с. прямо пропорциональна скорости изменения числа магнитных силовых линий, то максимальная э. д. с. наводится при прохождении магнитного поля через нуль, когда происходит наибольшее изменение числа магнитных силовых линий (моменты времени *1—1′*, *3—3′*, *5—5′* и т. д.), и наведенная э. д. с. равна нулю, когда число магнитных силовых линий не изменяется, т. е. когда магнитное поле проходит через максимум. Сле-

довательно, как показано на фиг. 9, э. д. с. рамки сдвинута по фазе относительно магнитного поля на 90°.

Следует еще отметить, что наведенная в рамочной антенне э. д. с. тем больше, чем больше число витков и площадь рамки.

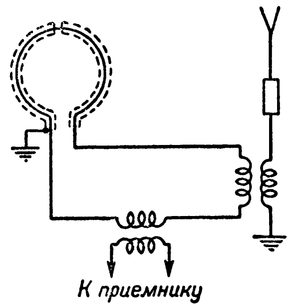
Для того чтобы не делать рамку больших размеров, ее проводники иногда наматывают на специальный сердечник, состоящий из спрессованного и склеенного изолирующим веществом мелкого железного порошка. Такой сердечник в несколько десятков раз увеличивает магнитный поток, пронизывающий рамку.

Рамочные антенны небольших размеров, используемые в самолетных и корабельных радиопеленгаторах, как правило, экранируют. Дело в том, что стороны обычной рамки имеют разную емкость относительно корпуса самолета или корабля, так как рамку нельзя расположить строго симметрично. Это приводит к тому, что рамка, кроме направленного приема, обладает также ненаправленным приемом — таким же, как на вертикальную антенну. Такое явление называется антенным эффектом. Оно уменьшает точность пеленгования. Борьба с антенным эффектом ведется путем применения специальных схем подключения рамки к приемнику, путем создания э. д. с., компенсирующей паразитную э. д. с. антенного эффекта, а также путем экранирования рамки и заземления экрана. Заземленный металлический экран симметрично окружает рамку, и поэтому выравнивает емкости отдельных сторон относительно корпуса, так что устраняется сама причина антенного эффекта. Однако при использовании сплошного экрана в нем наводятся электромагнитной волной кольцевые токи, которые создают поле, ослабляющее основное поле приходящей волны. Чтобы устранить кольцевые токи, в экране делается поперечный разрез.

В радиопеленгаторах находит применение антенная система, имеющая диаграмму направленности с одним максимумом и одним минимумом. Такую диаграмму направленности можно получить при сложении во входной цепи приемника двух э. д. с.: от рамочной антенны (или любой другой, имеющей восьмерочную диаграмму направленности) и от вертикальной антенны.

На фиг. 10 изображена схема, в которой происходит сложение этих э. д. с. При этом форма результирующей диаграммы направленности зависит от фазовых и амплитуд-

ных соотношений э. д. с. в месте сложения. Особое значение для практики имеет случай, когда э. д. с. рамки и вертикальной антенны совпадают по фазе, а максимальная амплитуда э. д. с. рамки равна амплитуде э. д. с. вертикальной антенны в месте сложения. На фиг. 11 изображены диаграммы направленности рамки и вертикальной антенны для этого случая. Чтобы построить результирующую диаграмму направленности, надо расположить в разных направлениях соответствующие отрезки, длина которых пропорциональна суммарной э. д. с. на входе приемника. Так как э. д. с. на входе приемника является суммой э. д. с. вертикальной антенны и рамки, то задача сводится к сложению двух диаграмм направ-



Фиг. 10. Схема комбинированного приема на рамку и вертикальную антенну.

Фиг. 11. Диаграмма направленности при комбинированном приеме (кардиоида).

ленности с учетом знаков. Знаки расставлены произвольно, но соответствуют тому, что э. д. с. вертикальной антенны в одних направлениях совпадает по фазе с э. д. с. рамки, а в противоположных — сдвинута по фазе на 180°.

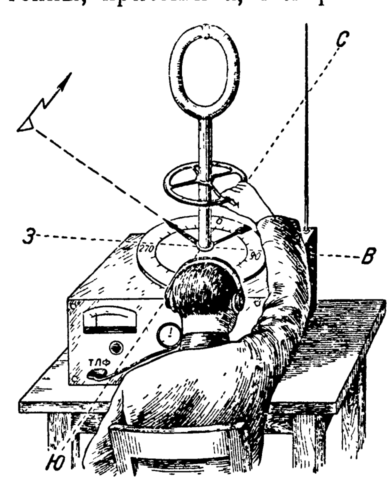
Проведем произвольно направления OA_1, OA_2, OA_3... и сложим соответственно э. д. с. рамки и антенны в этих направлениях с учетом знаков. Очевидно, что в направлениях OA_{10}, OA_{11} ... OA_{16} произойдет уменьшение результирующей э. д. с., так как знаки здесь противоположны. Кроме того, в направлении OA_{13} суммарная э. д. с. равна нулю (так как э. д. с. антенны и рамки равны и противоположны). В направлениях же OA_2, OA_3... OA_8 произойдет увеличение результирующей э. д. с., так как здесь знаки отдельных составляющих одинаковы. Если соединить полученные при

сложении точки плавной кривой, получим результирующую диаграмму направленности (см. пунктирную кривую на фиг. 11). Полученная кривая называется кардиоидой. Каковы ее особенности? Она имеет лишь один максимум и один минимум, расположенные на одной линии в плоскости рамки. Важно то, что минимум выражен здесь гораздо менее резко, чем в восьмерочной диаграмме направленности.

Мы рассмотрели приемные направленные антенны. Такие же антенны используются как передающие в радиомаяках. Если питать эти антенны соответствующим образом, то диаграмма направленности будет такая же, как в приемных антеннах (восьмерка, кардиоида). Так, например, две вертикальные разнесенные антенны имеют восьмерочную диаграмму направленности, если питать их в противофазе токами одинаковой амплитуды.

СЛУХОВЫЕ РАДИОПЕЛЕНГАТОРЫ

Простейший слуховой радиопеленгатор (фиг. 12) состоит из поворотной рамочной антенны, вертикальной антенны, приемника, телефонов и устройства для отсчета направления на радиостанцию. Вертикальная антенна и рамка могут подключаться к приемнику раздельно или совместно. В зависимости от этого диаграмма направленности будет иметь соответственно вид окружности, восьмерки или кардиоиды. Устройство отсчета состоит из неподвижной шкалы, проградуированной от 0 до 360°, и двух стрелок, жестко связанных с поворотной рамкой.



Фиг. 12. Слуховой радиопеленгатор с поворотной рамкой.

При установке радиопеленгатора на земле или корабле шкала ориентируется так, чтобы направление 0° совпадало либо с направлением меридиана, проходящего через радиопеленгатор (для наземного пеленгатора), либо с направлением продольной оси корабля. Одна из стрелок (с острым концом) укрепляется перпендикулярно плоскости

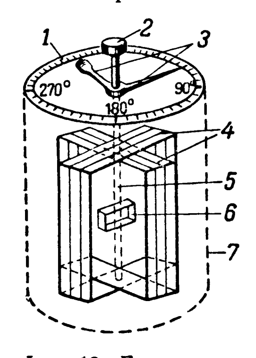
рамки и указывает, таким образом, направление ее нулевого приема, другая стрелка (с тупым концом) располагается вдоль плоскости рамки и указывает направление максимального приема при совместном приеме на рамку и вертикальную антенну. Принцип действия подобного радиопеленгатора заключается в том, что направление на радиостанцию определяется по изменению громкости сигналов в телефонах при повороте рамочной антенны. Сам процесс пеленгования радиостанции заключается в следующем. Подключив предварительно к приемнику вертикальную антенну, настраивают его на частоту радиостанции. Затем отключают вертикальную антенну, подключают рамку и, поворачивая ее, устанавливают в такое положение, при котором звук в телефонах отсутствует. Радиостанция при этом находится на перпендикуляре к плоскости рамки, а стрелка с острым концом отмечает на шкале угол между нулевым направлением и направлением на радиостанцию. Однако, если рамку повернуть на 180°, то звук в телефонах снова будет отсутствовать, и стрелка укажет угол, отличающийся от первого на 180°. Какой же из двух отсчетов правильный? При пеленговании радиостанции с помощью одной рамочной антенны ответить на этот вопрос нельзя, так как диаграмма направленности рамки имеет два направления нулевого приема.

Для устранения этой неопределенности в отсчете углов к приемнику подключают одновременно рамочную и вертикальную антенны. Диаграмма направленности приобретает вид кардиоиды.

Поворачивая рамку, устанавливают ее на этот раз в положение максимальной громкости. Радиостанция будет находиться теперь в направлении плоскости рамки, и именно в том направлении, которое указывает тупая стрелка устройства отсчета. Двухзначность в отсчете исключается, так как кардиоида имеет только один максимум и один минимум. Поскольку направление на радиостанцию не зависит от того, каким способом она пеленгуется, то при пеленговании на рамку и вертикальную антенну тупая стрелка окажется расположенной около одного из двух отсчетов, найденных ранее. Этот отсчет выбирается в качестве действительного направления на радиостанцию. Такое последовательное пеленгование радиостанции позволяет избавиться от неопределенности в отсчете и сохранить большую точность пеленгования, так как само пеленгование производится на рамку,

диаграмма направленности которой имеет более резкие минимумы, чем кардиоида.

Существенным недостатком описанного радиопеленгатора является то обстоятельство, что при пеленговании приходится поворачивать рамку. Однако рамки, и особенно Н-образные антенны, которые используются вместо рамок в коротковолновых радиопеленгаторах, имеют большие размеры. Например, высота Н-образных антенн достигает нескольких метров. Поворот таких антенн усложняет конструкцию радиопеленгатора, уменьшает точность определения направления и увеличивает время пеленгования. Этот недостаток устраняется в слуховом радиопеленгаторе с неподвижными антеннами и гониометром.



Фиг. 13. Гониометр.

1 — шкала; *2* — ручка; *3* — стрелки, *4* — статоры (полевые катушки); *5* — ось вращения; *6* — ротор (искательная катушка); *7* — экран.

В состав такого радиопеленгатора входят две взаимно перпендикулярные неподвижные рамки, или Н-образные антенны, вертикальная антенна, гониометр и приемник с телефонами.

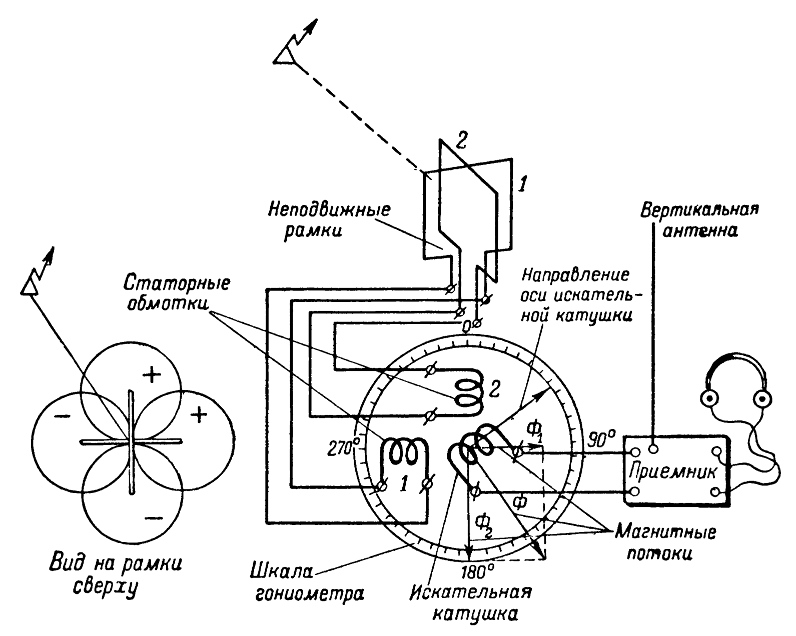
Гониометр предназначен для определения направления на радиостанцию и является важнейшим элементом радиопеленгатора. Он состоит (фиг. 13) из двух неподвижных взаимно перпендикулярных катушек, называемых полевыми, «искательной» катушки, неподвижной шкалы и двух стрелок — острой и тупой.

Искательная катушка находится в пространстве внутри полевых катушек и укрепляется на подвижной оси, с которой жестко связаны стрелки. Искательная катушка вместе со стрелками может поворачиваться от руки. Ее концы подключаются ко входу приемника. Полевые катушки гониометра подключаются к рамкам.

Гониометр является своеобразным высокочастотным трансформатором, имеющим две первичные обмотки (полевые катушки) и одну вторичную (искательная катушка). Электродвижущая сила в искательной катушке наводится общим магнитным потоком, который создается полевыми катушками (фиг. 14). Поворачивая искательную катушку, всегда можно найти такое ее положение, при котором э. д. с. в ней не наводится (ось катушки перпендикулярна магнитному потоку) или наводится максимальной величины

(ось катушки совпадает с направлением магнитного потока). Интересно отметить, что при повороте искательной катушки наведенная в ней э. д. с. меняется точно так же, как меняется э. д. с., наведенная в рамке, если рамку поворачивать.

Существенным моментом в работе гониометра является то обстоятельство, что направление общего магнитного по-



Фиг. 14. Схема радиопеленгатора с гониометром.

тока зависит от величины и сдвига фаз напряжений на полевых катушках (имеется в виду сдвиг фаз 0° или 180°). Так, например, если напряжение на первой полевой катушке отсутствует, то магнитный поток располагается по оси второй полевой катушки, и наоборот. Если к обеим катушкам приложено напряжение одновременно, то общий магнитный поток располагается под углом к осям полевых катушек. Его направление можно определить, если сложить по правилу параллелограмма векторы магнитных потоков, создаваемых отдельно каждой полевой катушкой.

Источниками напряжений для полевых катушек явля-

ются рамочные антенны. Величина и фаза этих напряжений зависят от расположения пеленгуемой радиостанции относительно антенн. Следовательно, направление общего магнитного потока в гониометре также зависит от направления на радиостанцию. Если установить искательную катушку так, чтобы звук в телефонах отсутствовал, то по расположению ее можно судить о направлении на радиостанцию. Соответствующий угол отмечается острой стрелкой гониометра на шкале. Однако, так же как при пеленговании радиостанции с помощью поворотной рамки, отсчет получается двухзначным. Для устранения двухзначности на вход приемника подается э. д. с. вертикальной антенны. Действительный отсчет указывается тупой стрелкой при том положении искательной катушки, при котором громкость звука в телефоне наибольшая.

Таким образом, пеленгование радиостанции с помощью гониометрического радиопеленгатора производится таким же способом, как при пеленговании на поворотную рамку, с той лишь разницей, что поворачивают не рамочную антенну, а искательную катушку гониометра.

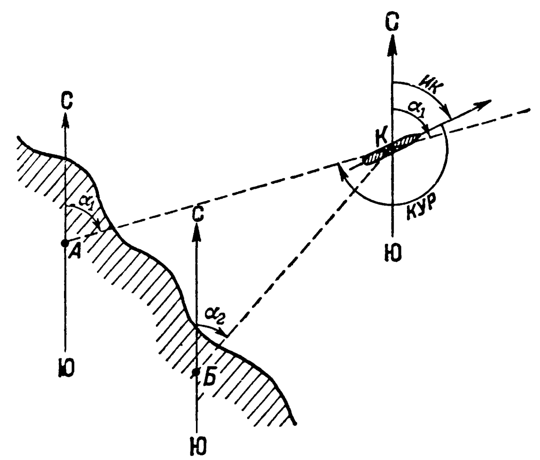
Слуховые радиопеленгаторы устанавливаются на кораблях или на земле и работают в диапазоне длинных, средних и коротких волн. С помощью этих радиопеленгаторов можно определить место корабля или самолета, вывести самолет или корабль на радиопеленгатор, контролировать путь.

Рассмотрим в качестве примера, как определяется место корабля в море с помощью корабельного радиопеленгатора. Пусть на берегу (фиг. 15) в точках *А* и *Б*, координаты которых известны, установлены передающие радиостанции. В точке *К* в море находится корабль. Если определить направления *АК* и *БК* и нанести их на карту, то корабль будет находиться в точке их пересечения. Чтобы нанести на карту эти направления, нужно определить углы α_1 и α_2, образованные меридианами, проходящими через радиостанции, и направлениями на корабль *АК* и *БК*. Эти углы называются обратными радиопеленгами (ОРП).

Корабельный радиопеленгатор непосредственно не может определить обратный радиопеленг, так как отсчет его представляет угол между продольной осью корабля и направлением на радиостанцию (так называемый курсовой угол радиостанции — КУР). Для определения обратного радиопеленга необходимо знать также курс корабля, представляющий собой угол между меридианом, проходящим через ко-

рабль, и продольной осью корабля. Курс определяется с помощью магнитного компаса.

Однако показание магнитного компаса не позволяет непосредственно отсчитать курс корабля. Дело в том, что магнитная стрелка при отсутствии вблизи железных предметов устанавливается вдоль магнитного меридиана, а не вдоль географического (истинного) меридиана, который наносится на карту. Между этими меридианами имеется угол, называемый магнитным склонением, ΔM. Величина и знак магнитного склонения отмечаются на картах.



Фиг. 15. Определение места корабля.

Под влиянием железных предметов, расположенных вблизи компаса, происходит отклонение стрелки магнитного компаса от направления магнитного меридиана. Это отклонение носит название девиации магнитного компаса и обозначается ΔK. Девиация магнитного компаса учитывается специальным графиком.

Таким образом, сняв показания магнитного компаса *КК*, (*КК* — компасный курс) и найдя значение ΔM и ΔK, находят курс корабля (*ИК* — истинный курс):

$$ИК = КК + \Delta M + \Delta K.$$

Радиопеленгатор, как и магнитный компас, непосредственно не определяет курсовой угол радиостанции. Направление на радиостанцию определяется с ошибкой, называемой радиодевиацией, ΔP. Чтобы найти курсовой угол

радиостанции, надо сложить отсчет пеленгатора *ОП* с радиодевиацией ΔP (определяется по специальным графикам):

$$КУР = ОП + \Delta P.$$

Из фиг. 15 видно, что обратный радиопеленг станции можно вычислить, если известны курс корабля и курсовой угол [1]:

$$ОРП = ИК + КУР \mp 180°.$$

Таким образом, определив корабельным радиопеленгатором курсовые углы двух радиостанций и заметив курс корабля по магнитному компасу, можно вычислить обратные радиопеленги и провести на карте две пересекающиеся прямые [2].

Место корабля или самолета можно также определить с помощью двух наземных радиопеленгаторов. На корабле или самолете в этом случае должна быть приемно-передающая радиостанция. Рассмотрим работу такой пеленгаторной сети при определении места самолета.

На земле в точках *А* и *Б* (фиг. 15) располагаются два радиопеленгатора. Между ними устанавливается телефонная связь или радиосвязь. Один из пеленгаторов является главным и имеет приемно-передающую радиостанцию для связи с самолетом. Желая определить место самолета, штурман связывается по радио с главным радиопеленгатором. Во время работы передатчика самолетной станции ее одновременно пеленгуют оба наземных пеленгатора. Отсчеты этих пеленгаторов представляют собой обратные радиопеленги. Второй радиопеленгатор сообщает свой отсчет главному. Здесь специальное лицо прокладывает на карте два направления, определяет место самолета и по радио передает найденное место на самолет. Определение места самолета занимает всего 1,5—2 мин.

В некоторых случаях устанавливается один радиопеленгатор. При этом на самолет сообщается не его место,

---

[1] Приведенное равенство не учитывает того, что меридианы сходятся на полюсах и поэтому не параллельны друг другу. Однако это обстоятельство можно учесть, если ввести соответствующую поправку.

[2] На практике прокладка направления на карте усложняется тем, что направление распространения радиоволн не изображается на карте прямой линией. Однако, введя поправку, место корабля можно определить по пересечению прямых линий.

а только направление на радиопеленгатор (ОРП). Если самолет летит так, что отсчеты, сообщаемые радиопеленгатором, не меняются, то он будет перемещаться по прямой, проходящей через радиопеленгатор. Этим пользуются для вывода самолета на радиопеленгатор.

САМОЛЕТНЫЕ РАДИОПЕЛЕНГАТОРЫ

Обслуживание слухового радиопеленгатора на самолете чрезвычайно затруднительно, не говоря уже о том, что шум внутри самолета сильно мешает определению пеленга по минимуму приема. Поэтому на самолете повсеместное распространение получили радиопеленгаторы со стрелочным индикатором, так называемые радиополукомпасы. Радиополукомпас (сокращенно РПК) позволяет определить угол между продольной осью самолета и направлением на радиостанцию. Радиополукомпас состоит из поворотной или неповоротной рамки, вертикальной антенны, приемника супергетеродинного типа, стрелочного прибора (индикатор курса) и устройства отсчета (датчик угла поворота рамки). Действие РПК построено на основе комбинированного приема на рамку и вертикальную антенну, наподобие слухового радиопеленгатора с устройством для определения стороны. Однако направление на радиостанцию определяется не по громкости звука в телефонах, а по нулевому показанию индикатора курса.

Принцип действия РПК можно понять из рассмотрения схемы фиг. 16.

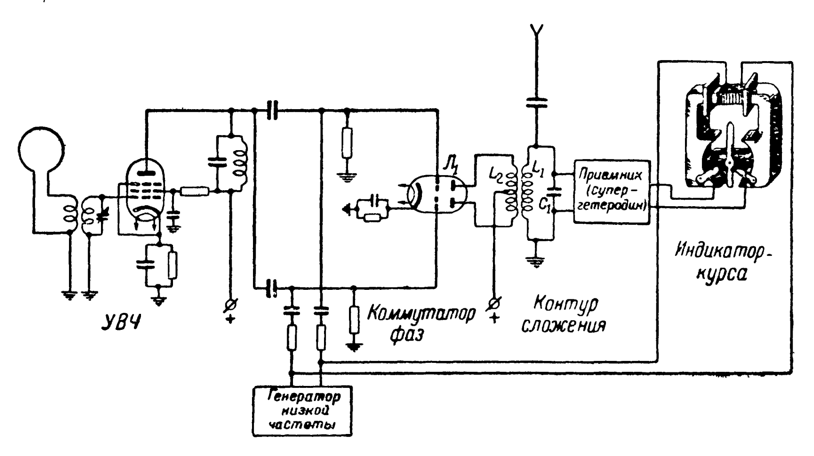
Принятый рамочной антенной сигнал после усиления в усилителе высокой частоты канала рамки поступает в коммутатор фаз, а отсюда — в контур сложения L_1C_1, куда также подается э. д. с. от вертикальной антенны. Коммутатор фаз периодически с низкой звуковой частотой меняет фазу рамочного напряжения в контуре сложения на 180°. Для этого он управляется специальным генератором звуковой частоты. В результате через каждую половину периода, в контуре сложения происходит то сложение антенного и рамочного напряжения, то их вычитание.

Одна из возможных схем коммутатора фаз изображена на фиг. 16. Здесь э. д. с. от рамки поступает на сетки правого и левого триодов лампы $Л_1$, куда, кроме того, в противофазе подведено напряжение низкой частоты. Благодаря этому триоды поочередно отпираются и запираются, вслед-

ствие чего меняется направление тока от источника через соответствующие части катушки L_2. Этот ток наводит э. д. с. в контуре сложения, которая либо совпадает по фазе, либо противоположна э. д. с. антенны.

Процесс сложения антенного и рамочного напряжений показан на фиг. 17 при различном расположении рамок относительно радиостанции.

На фиг. 17 показано, что в результате сложения и вычитания напряжений от рамки и от антенны в контуре сложения возникают колебания, промодулированные низкой



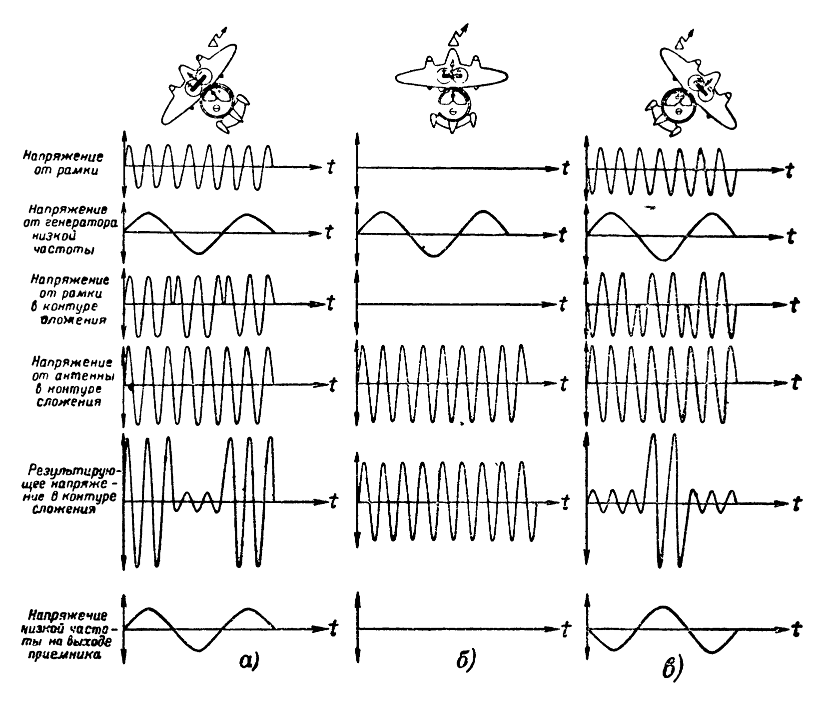
Фиг. 16. Схема радиополукомпаса.

звуковой частотой. Особенно важно то, что фаза огибающей этих колебаний зависит от положения рамки относительно радиостанции.

Сравнивая фиг. 17,*а* и 17,*в*, соответствующие случаям, когда рамка обращена разными боковыми сторонами к радиостанции, видим, что благодаря изменению фазы э. д. с. рамки на 180° происходит такое же изменение фазы огибающей напряжения контура сложения. Ниже будет показано, что это обстоятельство и позволяет определить направление отклонения рамки от радиостанции.

Для случая фиг. 17,*б*, где плоскость рамки перпендикулярна направлению на радиостанцию, рамочная э. д. с. равна нулю, и в контуре сложения действует только э. д. с. от антенны, так что модуляция низкой звуковой частотой вообще отсутствует.

Выходными каскадами РПК, как и в обычном приемнике, являются детектор и усилители низкой частоты. Здесь выделяется напряжение низкой звуковой частоты, фаза которого зависит от положения рамки относительно радиостанции. В случае, когда плоскость рамки перпендикулярна



Фиг. 17. Графическое изображение процессов в радиополукомпасе.

направлению на радиостанцию, напряжение на выходе равно нулю.

Рассмотрим теперь устройство индикатора курса. Он представляет собой ферродинамический прибор. На подковообразный сердечник из мягкой стали (фиг. 16) надета катушка. В межполюсном пространстве сердечника помещена другая катушка, имеющая возможность вращаться; на оси вращения укреплена стрелка. На шкале прибора посередине имеется нулевая отметка. При отсутствии вращающего момента, действующего на подвижную катушку, стрелка удерживается пружинками против этой отметки.

Если через катушки протекают переменные токи одинаковой частоты, то благодаря взаимодействию магнитных полей возникает вращающий момент, отклоняющий катушку вместе со стрелкой влево или вправо от нулевой отметки шкалы. При изменении в одной из катушек фазы тока на 180° отклонение стрелки будет происходить в обратном направлении. Если ток в одной катушке отсутствует, вращающий момент равен нулю, и стрелка прибора остается в нулевом положении.

На схеме фиг. 16 показано, что к неподвижной обмотке индикатора курса подведено напряжение непосредственно от генератора низкой частоты, а подвижная обмотка подключена к выходу РПК.

В зависимости от положения рамки относительно радиостанции токи в катушках будут иметь сдвиг фаз, равный 0°, 180° или же ток в подвижной катушке будет равен нулю. Соответственно стрелка индикатора курса будет отклоняться влево, вправо или же остается на нулевой отметке. Если, например, рамка укреплена неподвижно и ее плоскость перпендикулярна продольной оси самолета, то катушки подключаются таким образом, что при уклонении самолета вправо от радиостанции стрелка индикатора курса отклоняется вправо от нулевого деления (фиг. 17,*в*). При уклонении самолета влево от радиостанции стрелка индикатора курса отклоняется влево от нулевого деления (фиг. 17,*а*). Если самолет летит прямо на радиостанцию, то стрелка стоит против нулевого деления (фиг. 17,*б*). Если же самолет летит от радиостанции, то стрелка также стоит против нулевого деления, но в случае уклонения самолета соответственно влево и вправо стрелка отклонится наоборот, т. е. вправо и влево.

Часто рамка делается поворотной. Датчик поворота рамки соединяется с рамкой гибким валиком (фиг. 18,*а*) так, чтобы при любом положении рамки стрелка датчика указывала направление, перпендикулярное плоскости рамки, т. е. направление ее нулевого приема. В этом случае легко определить курсовой угол радиостанции.

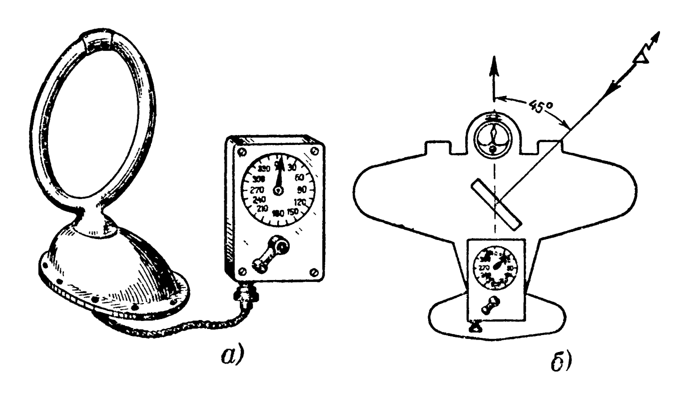
Допустим, радиостанция находится сбоку от линии полета самолета. Датчиком поворота рамку поворачивают до тех пор, пока линия нулевого приема не совпадет с направлением на радиостанцию, в результате чего стрелка индикатора курса станет на нуль.

По шкале датчика поворота смотрят, какой угол состав-

ляет линия нулевого приема рамки с продольной осью самолета (фиг. 18,*б*).

Радиостанция может находиться на линии нулевого приема как в направлении стрелки датчика, так и в обратной стороне; таким образом, на шкале датчика мы можем прочесть отсчет курсового угла с ошибкой на 180°. Как же устраняется эта неопределенность?

Для неподвижной рамки, укрепленной на самолете перпендикулярно его продольной оси, это делается разворотом самолета. Когда стрелка индикатора такого РПК стоит



Фиг. 18. Поворотная рамка с датчиком.

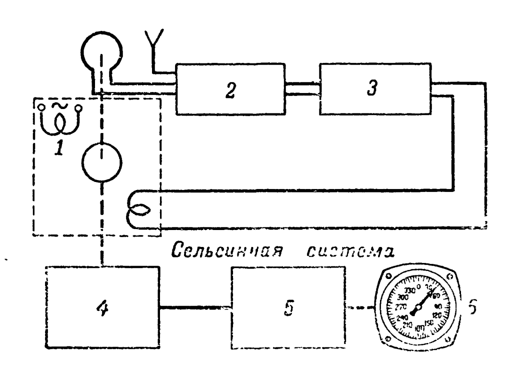
перед нулевым делением, то это означает, что самолет летит либо на радиостанцию, либо от радиостанции. Если слегка развернуть самолет вправо, стрелка индикатора отклонится вправо тогда, когда самолет летит на радиостанцию и отклонится влево, когда самолет летит от радиостанции.

Аналогично в случае поворотной рамки путем вращения датчика поворота в ту или другую сторону от деления, соответствующего направлению нулевого приема, можно по отклонению стрелки индикатора курса судить о правильности отсчета курсового угла [1]. Необходимость вращать ручку датчика поворота рамки и проверять правильность отсчета курсового угла радиостанции усложняет пользование радиополукомпасом на самолете.

[1] Обычно датчик присоединен таким образом, что при повороте стрелки датчика в сторону больших углов стрелка индикатора должна отклониться вправо; когда курсовой угол определен с ошибкой на 180°, стрелка индикатора курса отклонится влево.

Дальнейшим усовершенствованием РПК, устраняющим этот недостаток, является радиокомпас (сокращенно РК). Основное отличие его от РПК заключается в том, что поворот рамки производится не вручную, а автоматически.

Скелетная схема радиокомпаса изображена на фиг. 19. Основные составные части его следующие: рамочная антенна, радиополукомпасная часть (т. е. схема, аналогичная разобранной выше схеме радиополукомпаса, исключая лишь выходное устройство); каскад, управляющий вращением рамочной антенны в зависимости от положения ее относительно радиостанции (автомат вращения рамки), электродвигатель вращения рамки; сельсинная система, состоящая из двух сельсинов, из которых один является индикатором радиокомпаса (стрелка индикатора укреплена на оси ротора приемного сельсина).



Фиг. 19. Скелетная схема радиокомпаса.
1 — электродвигатель вращения рамки; *2* — радиополукомпасная часть; *3* — схема автомата рамки; *4* — сельсин-датчик; *5* — приемный сельсин; *6* — индикатор радиокомпаса.

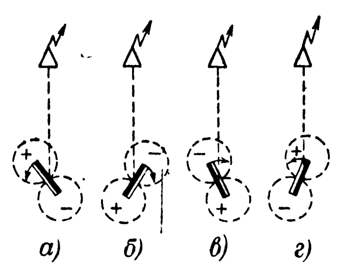
Сельсинная следящая система служит в данном случае для передачи угловых перемещений рамки на индикатор радиокомпаса. Она соответствует гибкому валику между рамкой и стрелкой индикатора.

Для поворота рамки используется двухфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, схема которого показана на фиг. 19. Статорные обмотки его питаются переменным напряжением. При этом делается так, что магнитные потоки статорных обмоток сдвинуты по фазе на 90°, в результате чего образуется вращающийся магнитный поток, который увлекает ротор мотора. Для того чтобы изменить направление вращения ротора, достаточно изменить фазу тока в одной из статорных обмоток на 180°. Если ток в одной из обмоток отсутствует, вращение ротора прекращается.

Рассмотрим теперь работу радиокомпаса. Принятый рамочной антенной сигнал проходит через такие же каскады,

как в радиополукомпасе. Благодаря этому на выходе радиополукомпасной части вырабатывается напряжение низкой звуковой частоты, фаза которого определяется положением рамки относительно радиостанции. Это напряжение воздействует на схему автомата рамки, который управляет величиной и фазой переменного напряжения, питающего одну из статорных обмоток электродвигателя вращения рамки.

Схема работает так, что при изменении фазы э. д. с. рамки на 180° фаза тока в этой обмотке также изменится на 180°. Вторая статорная обмотка питается непосредственно от источника переменного напряжения, так что фаза тока в ней не меняется.

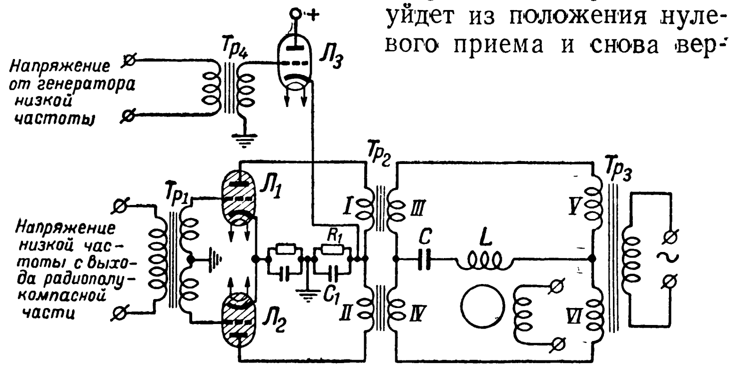


Фиг. 20. Вращение рамки при различном расположении ее плоскости относительно радиостанции.

Если плоскость рамки расположена перпендикулярно направлению на радиостанцию, то напряжение на входе схемы автомата равно нулю. При этом ток в соответствующей статорной обмотке электродвигателя также равен нулю, и электродвигатель не вращается. Если же рамка занимает произвольное положение, то на выходе автомата возникает напряжение, благодаря чему электродвигатель поворачивает рамку до тех пор, пока ее плоскость не окажется перпендикулярной направлению на радиостанцию. Направление вращения электродвигателя зависит от фазы рамочной э. д. с. На фиг. 20 изображены четыре положения рамки. Одна из сторон рамки для отличия отмечена жирной линией. В положениях *а* и *г* э. д. с. рамки сдвинута по фазе на 180° относительно э. д. с. в положениях *б* и *в*. Соответственно направления вращения электродвигателя в этих положениях будут противоположными.

Предположим, что в положениях *а* и *г* рамка будет поворачиваться электродвигателем против часовой стрелки, а в положениях *б* и *в* — по часовой стрелке. В положении *а* рамка поворачивается до тех пор, пока ее плоскость не станет перпендикулярной направлению на радиостанцию (положение нулевого приема рамки), после чего она повернется дальше по инерции и окажется в положении *б*. Здесь фаза э. д. с. рамки становится уже противоположной, и рамка движется в обратном направлении, пока снова не пройдет

положения нулевого приема. Практически эти колебания незначительны. Покажем теперь, что сторона, отмеченная на фиг. 20 жирной линией, всегда окажется обращенной к радиостанции. В самом деле, пусть рамка будет в положении нулевого приема повернута противоположной стороной к радиостанции. Тогда случайные небольшие толчки приведут ее в положение *в* или *г*, и она начнет поворачиваться соответственно по часовой стрелке или против нее, уйдет из положения нулевого приема и снова вернется в него, но уже будучи повернутой другой (жирной) стороной к радиостанции.



Фиг. 21. Схема автомата вращения рамки.

Отсюда следует, что если рамка радиокомпаса попала в поле радиостанции, то она будет иметь лишь одно устойчивое положение равновесия. На схеме фиг. 19 показано, что ось вращения рамки связана с осью ротора сельсина-датчика. Поэтому все движения, совершаемые рамкой, повторяются как ротором сельсина-датчика, так и ротором приемного сельсина (индикатора радиокомпаса). Стрелка индикатора радиокомпаса, следовательно, фиксирует положение рамки и указывает угол между продольной осью самолета и направлением на радиостанцию.

Интерес представляет работа автомата рамки. Одна из возможных схем изображена на фиг. 21. Здесь на сетки тиратронов $Л_1$ и $Л_2$ напряжение низкой звуковой частоты радиополукомпасной части (фаза которого зависит от положения рамки) подается в противофазе, т. е. в один и тот же момент времени на одной из сеток будет положительный полупериод, а на другой — отрицательный. Напряжение этой же частоты от генератора звуковой частоты радио-

полукомпасной части подается на сетку электронной лампы $Л_3$. При этом ток лампы меняется с низкой звуковой частотой, создавая падение напряжения на R_1C_1, что соответственно изменяет напряжение на анодах тиратронов в одинаковой фазе, т. е. напряжение одновременно увеличивается и уменьшается на анодах обоих тиратронов.

Известно, что для зажигания тиратрона требуются одновременно достаточно большие напряжения на аноде и сетке. Например, в данной схеме зажигание произойдет лишь при совпадении положительного полупериода напряжения на сетке и на аноде.

Если в данный момент времени на анодах ламп $Л_1$ и $Л_2$ положительный полупериод напряжения, то отпертым окажется тот тиратрон, на сетке которого также положительный полупериод. Следовательно, в зависимости от фазы напряжения низкой звуковой частоты вследствие разного положения рамки отпертым оказывается либо один, либо другой тиратрон.

Таким образом, ток течет либо через обмотку *I*, либо через обмотку *II* трансформатора $Тр_2$. Протекание тока тиратрона через одну из указанных обмоток вызывает насыщение соответствующего сердечника трансформатора $Тр_2$. Но насыщение сердечника какой-либо катушки приводит к резкому снижению коэффициента самоиндукции ее, и если по ней протекает переменный ток, то индуктивное сопротивление также резко падает.

Рассмотрим теперь цепь, состоящую из обмоток *III*, *IV*, *V*, *VI*. Эта цепь образует схему моста, в котором обмотки трансформаторов $Тр_2$ и $Тр_3$ являются плечами, а статорная обмотка электродвигателя вращения рамки L и конденсатор C — диагональю. Плечи питаются переменным напряжением, которое подается на первичную обмотку трансформатора $Тр_3$. Как известно, ток через диагональ протекает только в том случае, когда мост разбалансирован, например если сопротивления плеч *III* и *IV* не равны. Так и получается благодаря действию тиратронов: если проводит тиратрон $Л_1$, индуктивное сопротивление обмотки *IV* больше, чем обмотки *III*, если же проводит тиратрон $Л_2$, то наоборот. Это непосредственно влияет на фазу тока в диагонали моста, т. е. в одной из статорных обмоток электродвигателя вращения рамки.

Из сказанного можно заключить, что при изменении фазы э. д. с. рамки, а следовательно, и фазы напряжения,

поступающего на сетки тиратронов, происходит изменение фазы тока статорной обмотки электродвигателя. Если рамка перпендикулярна направлению на радиостанцию, то оба тиратрона заперты, мост сбалансирован и электродвигатель не вращается. Такая схема, как было видно выше, полностью обеспечивает работу радиокомпаса, так как может производить поворот рамки всегда в одно и то же положение нулевого приема.

Радиокомпас дает возможность штурману самолета весьма просто решить ряд важных задач самолетовождения, например определить место самолета по двум наземным радиостанциям, выходить на нужную радиостанцию и определять момент пролета ее и т. д. Для получения отсчета радиокомпаса надо лишь настроиться на нужную радиостанцию, после чего стрелка укажет ее курсовой угол. Момент пролета самолетной радиостанции отмечается также наглядно: стрелка индикатора перекидывается из положения 0° в положение 180°.

Самолетные радиопеленгаторы работают, как правило, в средневолновом диапазоне.

РАДИОПЕЛЕНГАТОР С ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТРУБКОЙ

В настоящее время, кроме самолетных автоматических радиопеленгаторов (радиокомпасов), применяются наземные автоматические радиопеленгаторы с электронно-лучевой трубкой в качестве индикатора.

Электронно-лучевая трубка широко используется в технике для наблюдения формы электрических колебаний и различных измерений. Она представляет собой специальную стеклянную колбу с высоким вакуумом, внутри которой помещается устройство, создающее тонкий пучок электронов («электронная пушка»), и две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин (*xx* и *yy*). Пучок электронов проходит между пластинами и попадает на экран, покрытый веществом, способным светиться под действием электронов.

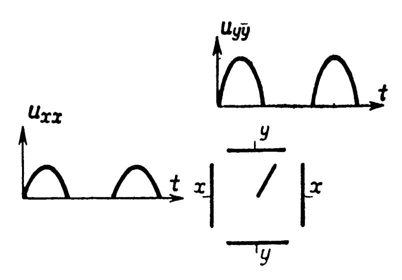
Если на пластины не подавать никаких напряжений, то в центре экрана образуется светлое пятнышко. Если же подавать на пластины переменные напряжения, то пятнышко описывает на экране определенную линию. Так как частота этого напряжения, как правило, достаточна велика, то на экране видна сплошная линия без мельканий.

Если переменное напряжение приложено между вертикально отклоняющими пластинами *yy* (фиг. 22), то луч

движется по вертикали, и на экране видна вертикальная прямая линия; если же переменное напряжение приложено между горизонтально отклоняющими пластинами *xx*, то на экране видна горизонтальная линия.

На фиг. 22 показан случай, когда к пластинам приложены пульсирующие напряжения U_{xx} и U_{yy} одинаковой частоты, но разной амплитуды. В этом случае электронный луч описывает на экране линию под некоторым углом, начинающуюся с центра экрана. При равенстве амплитуд U_{xx} и U_{yy} угол наклона равен 45°. Меняя соотношения амплитуд и знаки напряжений отклоняющих пластин, мы получим на экране прямую линию, наклоненную под любым углом.

Рассмотрим кратко устройство автоматического радиопеленгатора с электронно-лучевой трубкой, работающего в диапазоне УКВ. На фиг. 23 изображена его скелетная схема. Работа этого радиопеленгатора напоминает в общих чертах работу радиокомпаса.



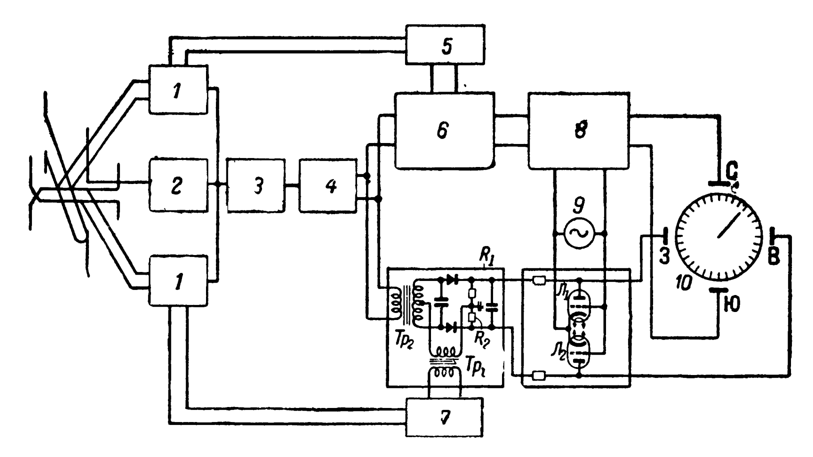
Фиг. 22. Отклонение луча в электронно-лучевой трубке.

Антенная система состоит из двух взаимно перпендикулярных Н-образных антенн и вертикальной антенны, расположенной в центре. Электродвижущая сила, наведенная в каждой из антенн, усиливается в различных каналах. Напряжение от вертикальной антенны попадает непосредственно в контур сложения, а напряжение от Н-образных антенн попадает туда же, пройдя, как и в радиокомпасе, через соответствующие коммутаторы фаз.

Каждый из коммутаторов фаз управляется своим низкочастотным генератором. Например, частота одного может быть 5 *кгц*, а второго 6 *кгц*. Благодаря сложению напряжений от Н-образных антенн, полученных после коммутаторов фаз, с напряжением от вертикальной антенны в контуре сложения возникают два напряжения с частотой приходящего сигнала: одно промодулировано частотой 5 *кгц*, а другое — частотой 6 *кгц*. Очевидно, что,так же как в радиокомпасе, фаза каждой огибающей зависит от расположения соответствующей пары Н-образных антенн относительно направления на радиостанцию. Оба напряжения усиливаются

обычным приемником супергетеродинного типа, на выходе которого с помощью фильтров происходит разделение напряжений 5 и 6 *кгц*.

Каждое из этих напряжений воздействует на специальную схему — так называемый дифференциальный детектор. Эта схема вместе с еще одним каскадом — электронным переключателем — управляет напряжениями, непосредственно приложенными к отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки. Так как оба дифференциальных детектора совершенно одинаковы, то достаточно рассмотреть один из них.



Фиг. 23. Скелетная схема радиопеленгатора с электронно-лучевой трубкой.

1 — коммутатор фаз; *2* — усилитель высокой частоты; *3* — контур сложения; *4* — приемник; *5* — генератор 6 *кгц*; *6* — дифференциальный детектор; *7* — генератор 5 *кгц*; *8* — электронный переключатель; *9* — дополнительный генератор; *10* — электронно-лучевая трубка.

Пусть напряжение в трансформаторе $Тр_2$ от одной из двух пар Н-образных антенн (например, расположенных в направлении восток — запад) равно нулю (направление на радиостанцию перпендикулярно плоскости этих антенн). Тогда в схеме действует напряжение только от звукового генератора, и на нагрузочных сопротивлениях R_1 и R_2 в результате детектирования выделяются одинаковые постоянные напряжения. Если плоскость антенн не перпендикулярна направлению на радиостанцию, то в одной половине вторичной обмотки трансформатора $Тр_2$ напряжение нахо-

дится в фазе с напряжением от $Тр_1$, а в другой действует напряжение, находящееся в противофазе с напряжением от $Тр_1$. Таким образом, на один детектор действует сумма напряжений, а на другой — разность. В этом случае напряжения на нагрузочных сопротивлениях R_1 и R_2 будут после детектирования различными. Соотношение между ними зависит от фазы напряжения на трансформаторе $Тр_2$, т. е. опять-таки от расположения плоскости соответствующей пары антенн относительно радиостанции.

Напряжения с сопротивлений R_1 и R_2 подаются на аноды ламп $Л_1$ и $Л_2$ (электронные переключатели). Сетки этих ламп питаются в фазе от дополнительного генератора звуковой частоты, в результате чего лампы периодически отпираются и запираются. В отпертом состоянии напряжения на анодах этих ламп, а следовательно, и на пластинах электронно-лучевой трубки зависят от напряжений, поданных с R_1 и R_2.

Между пластинами трубки действует пульсирующее напряжение (с частотой дополнительного генератора), отклоняющее электронный луч влево или вправо от центра. Аналогично за счет второго дифференциального детектора и соответствующих электронных переключателей луч будет перемещаться вверх или вниз.

Если радиостанция не работает, то потенциалы пластин каждой пары изменяются одинаково, и разность потенциалов между ними всегда равна нулю, так как напряжения, подаваемые с нагрузочных сопротивлений на аноды электронных переключателей, будут равны. Поэтому луч находится в центре экрана.

Если же радиостанция работает, то напряжения на нагрузочных сопротивлениях не равны, и между пластинами каждой пары действует определенная разность потенциалов соответствующей полярности. Происходит отклонение луча от центра. Схема отрегулирована так, что когда радиостанция находится в направлении на восток или на запад, луч отклоняется вправо или влево, а когда в направлении север — юг, то соответственно вверх и вниз. Если же радиостанция находится в произвольном направлении относительно Н-образных антенн, то пульсирующее напряжение будет действовать между пластинами каждой пары и заставит луч отклоняться в направлении, соответствующем направлению радиостанции. Положение линии на экране дает непосредственный отсчет пеленга.

ОШИБКИ РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ

Вопрос о точности пеленгования имеет существенное значение, так как направление на радиостанцию всегда определяется с некоторой ошибкой. Эта ошибка вызывается следующими причинами:

1. Индивидуальными качествами оператора.

2. Воздействием помех на радиопеленгатор. Помехи маскируют момент пропадания сигнала при пеленговании по минимуму приема.

3. Несовершенством конструкции самого радиопеленгатора.

4. Особенностями распространения радиоволн. Сюда относятся уже знакомые ошибки за счет «ночного эффекта». Кроме того, существенное значение имеет непрямолинейность распространения радиоволн при движении над неоднородной поверхностью. Например, при пересечении радиоволнами берега моря происходит искривление пути радиоволны. То же происходит в горной местности. Ошибки за счет ночного, берегового и горного эффектов могут достигать десятков градусов.

5. Влиянием предметов, расположенных вблизи антенной системы радиопеленгаторов: мачт, строений, корпуса самолета или корабля и т. д. Эти ошибки называются радиодевиацией. Они могут достигать больших значений. Так, например, радиодевиация РПК за счет влияния корпуса самолета доходит до 15—20°.

Радиодевиация может быть учтена. Как правило, это делается с помощью специальных графиков. Иногда радиодевиация учитывается автоматически. Следует отметить, что при небольшом уровне помех и отсутствии ошибок за счет распространения радиоволн ошибки пеленгования могут быть сведены к 1—2°.

РАДИОМАЯКИ

Радиомаяком, как уже отмечалось выше, называется передающая радиостанция с известным географическим положением, излучающая специальные сигналы, по которым штурман корабля или самолета может определить направление на радиомаяк.

Антенны радиомаячных устройств могут быть ненаправленного и направленного действия. В соответствии с этим различают маяки ненаправленные и направленные.

Ненаправленные радиомаяки по существу ничем не отличаются от обычных связных или вещательных станций. Передача ведется незатухающими или тональными колебаниями (речь, музыка). Для определения направления на радиомаяк необходимо иметь на корабле или самолете какой-либо радиопеленгатор. Само пеленгование радиомаяка производится уже известными читателю методами.

Для удобства выхода самолета на аэродром ненаправленные радиомаяки, обслуживающие авиацию, часто устанавливаются в районе аэродрома. Подобные радиомаяки называются приводными станциями. В качестве ненаправленных радиомаяков используются также мощные широковещательные радиостанции.

Направленные радиомаяки в отличие от ненаправленных излучают по различным направлениям с различной интенсивностью и позволяют определить направление на радиомаяк без радиопеленгатора. Часто для приема сигналов направленного радиомаяка достаточно иметь на самолете или корабле обычный приемник с ненаправленной антенной и телефонами.

Направленные маяки в зависимости от того, позволяют ли они определить только некоторые направления в пространстве или любые направления, можно разделить на равносигнальные радиомаяки и радиомаяки всенаправленные.

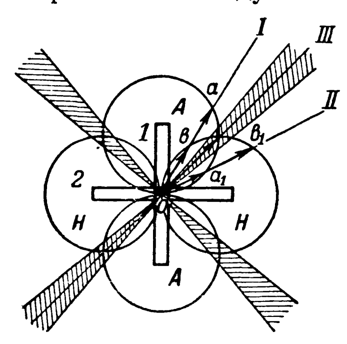
РАВНОСИГНАЛЬНЫЕ РАДИОМАЯКИ

Простейший равносигнальный радиомаяк состоит из передатчика, двух неподвижных рамок, расположенных под углом друг к другу, и коммутатора, подключающего рамки поочередно к передатчику. Передатчик манипулируется ключом. В пространство излучаются две буквы: *А* (.—) и *Н* (—.). При подключении первой рамки излучается буква *А*, при подключении второй рамки — буква *Н*. Диаграммы излучения каждой рамки имеют, как уже известно, вид восьмерки. На самолете или корабле сигнал радиомаяка принимают на обычный приемник с ненаправленной антенной.

Как же будут слышны сигналы *А* и *Н* на самолете, если самолет относительно радиомаяка находится на различных направлениях? Пусть самолет находится на направлении *I* (фиг. 24). Из диаграммы направленности рамок *1* и *2* следует, что по указанному направлению рамка *1* излучает

с большей интенсивностью, чем рамка *2* (вектор *Оа* больше вектора *Ов*), и следовательно, сигнал *А* будет слышен громче сигнала *Н*. Если самолет находится на направлении *II*, то по тем же причинам сигнал *Н* будет слышен громче сигнала *А*. Наконец, если самолет находится на направлении *III*, сигналы *А* и *Н* слышны с одинаковой громкостью, так как обе рамки по указанному направлению излучают с одинаковой интенсивностью.

Это направление называется равносигнальным. Но ухо не может отличить по громкости два сигнала, если разница в громкости между ними очень мала. Поэтому сигналы *А* и *Н* слышны одинаково громко не только в равносигнальном направлении, но также в некоторой зоне около этого направления. Из фиг. 24 видно, что вокруг радиомаяка создаются четыре равносигнальных зоны. Ширина этих зон достигает 2—6°.

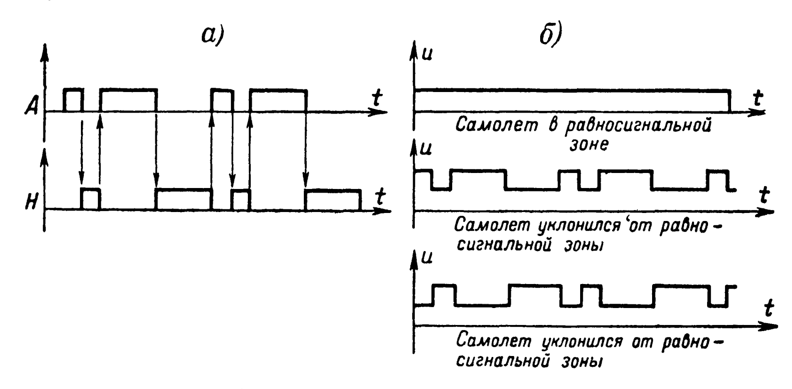


Фиг. 24. Работа радиомаяка зоной.

Равносигнальные радиомаяки используются в тех случаях, когда самолет или корабль движется по заранее заданному маршруту, совпадающему с направлением одной из равносигнальных зон. При этом самолет или корабль должен удерживаться в пути так, чтобы громкость сигналов *А* и *Н* на выходе приемника была одинаковой. При уклонении самолета или корабля в ту или иную сторону от равносигнальной зоны одна из букв будет слышна громче другой. С помощью равносигнальной зоны можно также выходить на радиомаяк.

Более удобным для штурмана является несколько иной порядок излучения радиомаяком букв *А* и *Н*, а именно: одна из букв передается во время пауз между сигналами другой. На фиг. 25,*а* стрелками показана последовательность излучения тире и точек букв *А* и *Н*. Таким образом, радиомаяк излучает непрерывно, без пауз. Если самолет находится в направлении равносигнальной зоны, то штурман на самолете услышит сплошной тон, на котором не прослушивается ни одна из букв. При уклонении из равносигнальной зоны в ту или иную сторону на общем тоне будет прослу-

шиваться только одна из букв *A* или *H*. Сказанное иллюстрируется фиг. 25,*б*. Подобный порядок излучения сигналов удобен тем, что штурману не приходится непрерывно сравнивать громкость двух сигналов, как это было при поочередном излучении радиомаяком букв *A* и *H*.



Фиг. 25. Работа радиомаяка в перекрытии.

В некоторых случаях самолетное устройство снабжается выходным стрелочным индикатором. При уклонении самолета в ту или иную сторону от равносигнальной зоны стрелка прибора отклоняется в соответствующую сторону от нулевого положения.

ВСЕНАПРАВЛЕННЫЕ РАДИОМАЯКИ

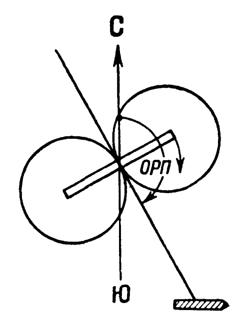
Всенаправленный радиомаяк позволяет определить направление независимо от того, где находится корабль или самолет. Прием сигналов таких радиомаяков производится также на приемник с ненаправленной антенной.

Характерной особенностью работы всенаправленного радиомаяка является то обстоятельство, что его диаграмма излучения, имеющая вид восьмерки или кардиоиды, не остается в пространстве неподвижной, а непрерывно вращается. Достигается такое вращение диаграммы либо механическим вращением антенны, либо каким-нибудь другим способом.

Простейший всенаправленный радиомаяк состоит из передатчика и подключенной к нему рамочной антенны. С помощью электродвигателя рамка непрерывно вращается с определенной скоростью. При этом в пространстве вра-

щается с такой же скоростью диаграмма излучения рамки— восьмерка (фиг. 26).

Когда при вращении рамки ее плоскость оказывается перпендикулярной к меридиану, проходящему через радиомаяк, излучается характерный так называемый «северный сигнал». В этот момент на корабле, где принимаются сигналы маяка, пускается в ход секундомер. Через некоторое время, при повороте рамки, перпендикуляр к ее плоскости будет направлен на корабль, и сигналы маяка на корабле слышны не будут. В этот момент секундомер стопорится. Время, отмеченное секундомером, позволяет вычислить обратный радиопеленг маяка $ОРП = t \cdot n$, где t — время, отмеченное по секундомеру, и n — скорость вращения рамки.



Фиг. 26. Определение направления на радиомаяк с поворотной рамкой.

Так как рамка имеет два направления нулевого излучения, отсчет направления на радиомаяк получается двухзначным.

Обычно для морского корабля это не имеет существенного значения, так как штурман приблизительно знает, в каком районе находится корабль.

Большим недостатком такого маяка является необходимость вращать рамочную антенну, которая в диапазоне средних волн для маяков с большой дальностью действия должна иметь большие размеры. Более удобным всенаправленным маяком является многорамочный радиомаяк, предложенный советскими инженерами в 1928—1929 гг. Восьмерочная диаграмма излучения в таком радиомаяке вращается не непрерывно, а скачками, переходя из одного положения в соседнее. Для определения направления на радиомаяк секундомера не требуется.

Антенная система подобного радиомаяка состоит из большого числа неподвижных рамок, расположенных под углом друг к другу. Числс рамок обычно выбирается 16 или 18.

Для простоты будем считать, что антенная система состоит из четырех рамок (фиг. 27).

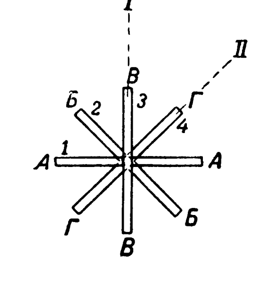
Рамки подключаются к передатчику поочередно. При подключении передатчика к какой-либо рамке излучается вполне определенная присвоенная этой рамке буква. Напри-

мер, при подключении рамки *1* излучается буква *А*, при подключении рамки *2*—буква *Б* и т. д.

Сигналы радиомаяка принимаются на самолете обычным приемником с ненаправленной антенной. Поскольку самолет относительно различных рамок расположен неодинаково, то в направлении на самолет различные рамки излучают с различной интенсивностью, и следовательно, сигналы радиомаяка слышны на самолете с неодинаковой громкостью.

Так, например, когда самолет находится в направлении *I*, перпендикулярном плоскости рамки *1*, буквы *А* слышно не будет. Если громкость соответствующего сигнала отмечать размером буквы, то на самолете в этом случае сигналы радиомаяка будут слышны так: БВГ.

При другом расположении самолета, например на направлении *II*, на нем будут с той или иной громкостью слышны все сигналы радиомаяка, за исключением сигнала *Б*, так как самолет находится на направлении, перпендикулярном плоскости рамки *2*, излучающей сигналы *Б*.



Фиг. 27. Работа многорамочного радиомаяка.

Расположение рамок радиомаяка относительно стран света, а также последовательность излучения сигналов штурману самолета известны.

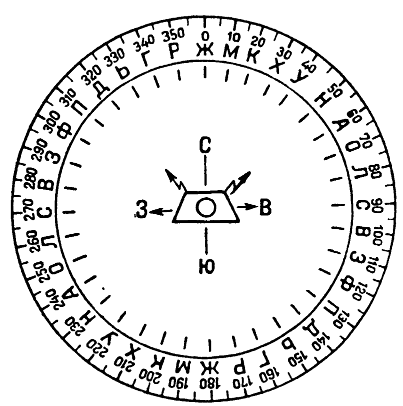
Таким образом, прослушивая на самолете сигналы радиомаяка и определяя, какая именно буква выпадает, можно определить ту рамку, на перпендикуляре к плоскости которой самолет находится. Поскольку расположение рамки относительно меридиана, проходящего через радиомаяк, известно, то тем самым определяется и направление от радиомаяка на самолет.

Практически направление на самолет определяется следующим образом. У штурмана имеется так называемая палетка (фиг. 28), на которой указано, на каком направлении какой сигнал должен выпадать. Прослушивая на самолете сигналы радиомаяка и определяя пропадающую букву, находят по палетке соответствующие углы. Отсчет направления в данном случае является двухзначным. Точность определения направления достигает 3—5°.

Подобные радиомаяки работают обычно в диапазоне средних волн. Их дальность действия определяется, в основ-

ном, мощностью передатчика. При средней мощности дальность действия радиомаяка достигает 400—600 *км.*

В многорамочном маяке, как было уже сказано, диаграмма излучения перемещается скачком из одного положения в другое при переключении передатчика с одной рамки на соседнюю. Собственно говоря, большое число рамок для того только и требуется, чтобы получить эффект поворота в пространстве диаграммы излучения. Такой поворот диаграммы можно получить и другим путем. Для этой цели необходимо иметь две неподвижные перпендикулярные рамки (или две пары разнесенных вертикальных антенн) и гониометр, принципиально не отличающийся от уже рассмотренного выше (фиг. 13). Ротор гониометра подключается к выходу передатчика, статорные катушки — к рамкам [1].



Фиг. 28. Палетка штурмана.

При вращении ротора меняются по величине и фазе наводимые в статорных катушках э. д. с. и в соответствии с этим меняются величины и фазы токов, протекающих в излучающих рамках.

Рамки излучают одновременно. Результирующая диаграмма излучения такой антенной системы имеет вид восьмерки. В этом нетрудно убедиться, если произвести графически сложение двух перпендикулярных восьмерочных диаграмм. Расположение результирующей диаграммы в пространстве зависит от интенсивности и фазы излучения каждой рамки, и следовательно, зависит от положения ротора гониометра. Таким образом, вращая ротор гониометра, можно поворачивать в пространстве диаграмму излучения. Это, конечно, много проще, чем вращать рамку больших размеров.

Для получения «перескакивающей» диаграммы вместо переключения рамок производится поворот ротора гонио-

[1] Иногда к передатчику подключается большая неподвижная катушка, внутри которой вращаются две перпендикулярные катушки, соединенные с помощью скользящего контакта с рамками.

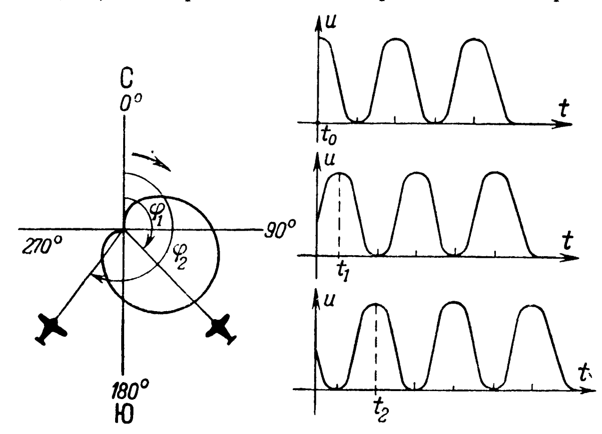
метра на соответствующий угол. Способ определения направления на гониометрический радиомаяк ничем не отличается от разобранного случая определения направления на многорамочный радиомаяк.

На УКВ нашли применение так называемые всенаправленные «говорящие» радиомаяки.

«Говорящий» радиомаяк имеет поворотную антенну с диаграммой излучения, напоминающей вытянутую кардиоиду. Антенна вращается электродвигателем. Через каждые 10° поворота антенны, микрофоном сообщается направление максимума диаграммы излучения. Когда максимум диаграммы проходит через направление на самолет, в телефонах самолетного приемника слышен голос, сообщающий соответствующее направление. При других положениях антенны голос или совсем не слышен, или слышен слабо. Дальность действия подобного маяка не превосходит 150 *км*; направление определяется с точностью до 10°.

Общим недостатком рассмотренных всенаправленных радиомаяков является необходимость длительное время прослушивать их сигналы, прежде чем штурман может определить интересующие его направления. Этот недостаток особенно сильно ощущается на самолете. Значительно более удобно иметь на самолете или корабле какой-либо зрительный прибор, по которому можно определить направление на радиомаяк. Подобные всенаправленные маяки впервые были предложены советскими инженерами Л. Е. Штилерманом и А. Н. Племянниковым в 1934 г. и получили название фазовых всенаправленных маяков. В фазовых всенаправленных маяках используются быстро вращающиеся диаграммы излучения в форме кардиоиды (фиг. 29). Если принимать сигналы такого радиомаяка на приемник с ненаправленной антенной, то интенсивность высокочастотного сигнала на входе приемника будет непрерывно меняться: когда максимум кардиоиды направлен на самолет, интенсивность сигнала наибольшая; при повороте кардиоидной диаграммы от этого положения на 180° напряжение на входе приемника отсутствует. Таким образом, благодаря тому, что кардиоида вращается, сигнал на входе приемника оказывается модулированным по амплитуде. После усиления и детектирования входного напряжения на выходе приемника возникает низкочастотное напряжение, период которого, очевидно, равен времени одного оборота кардиоидной диаграммы (фиг. 29).

Существенным при этом является то, что фаза этого низкочастотного напряжения зависит от направления на радиомаяк. Действительно, при вращении кардиоиды ее максимум вначале проходит через нулевое направление (северное направление меридиана, проходящего через радиомаяк), затем через направления φ_1, φ_2 и т. д. Следовательно, и положительные максимумы низкочастотного напряжения будут наблюдаться в различные моменты времени (t_0, t_1, t_2) для различных направлений на радиомаяк.



Фиг. 29. Принцип работы фазового всенаправленного радиомаяка.

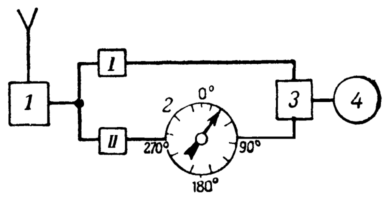
Если теперь каким-либо образом измерить сдвиг фаз низкочастотных напряжений на данном и на нулевом направлениях, то этот сдвиг фаз, выраженный в градусах, укажет направление на радиомаяк (обратный радиопеленг маяка). Полному изменению направления на 360° соответствует также сдвиг фазы на 360°.

Существует несколько методов определения этого сдвига фаз. Один из методов заключается в том, что на радиомаяке производится частотная модуляция выходного напряжения. При этом частота модулирующего напряжения выбирается такой же, как частота напряжения, получающегося на выходе самолетного приемника в результате вращения кардиоидной диаграммы [1].

[1] Практически производится амплитудная модуляция частотой более высокой (10 000 *гц*). В свою очередь, это модулирующее напряжение модулируется по частоте напряжением 60 *гц* (скорость вращения диаграммы 60 об/сек.).

Фаза модулирующего напряжения не зависит от направления; она выбирается такой же, какой получается фаза напряжения за счет вращения кардиоиды на нулевом направлении.

На фиг. 30 показана упрощенная скелетная схема самолетного устройства для приема сигналов такого радиомаяка. Выходное напряжение приемника *1* подводится к двум цепям *I* и *II*: первая цепь *I* выделяет низкочастотное напряжение, фаза которого зависит от направления на радиомаяк; вторая цепь *II* выделяет низкочастотное напряжение, фаза которого от направления на радиомаяк не зависит. Выходное напряжение второй цепи поступает на фазовращатель *2*. Поворачивая от руки ротор фазовращателя со стрелкой, можно плавно изменять фазу выходного напряжения фазовращателя относительно фазы входного напряжения. Стрелка отмечает на неподвижной шкале этот сдвиг фаз в градусах. Напряжения с выхода первой цепи и фазовращателя подаются на так называемый дискриминатор *3*. Дискриминатор вырабатывает напряжение, величина и знак которого зависят от сдвига фаз поступающих напряжений. К дискриминатору подключен прибор-индикатор *4*.



Фиг. 30. Упрощенная скелетная схема для приема сигнала фазового всенаправленного радиомаяка.

1 — приемник; *2* — фазовращатель; *3* — дискриминатор; *4* — индикатор.

Направление на радиомаяк определяется сравнительно просто: для этого нужно, поворачивая ротор фазовращателя, установить его в такое положение, при котором индикатор отмечает совпадение по фазе напряжений на дискриминаторе. Очевидно, при этом сдвиг фаз, созданный фазовращателем, равен сдвигу фаз между выходными напряжениями цепей *I* и *II*, т. е. как раз и является тем сдвигом фаз, который позволяет определить направление на радиомаяк. Соответствующий угол отмечается стрелкой фазовращателя.

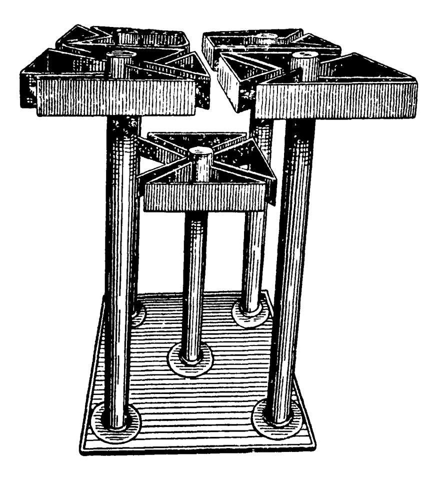
На фиг. 31 представлена антенная система всенаправленного радиомаяка УКВ подобного типа.

Антенна состоит из пяти горизонтальных рамок [1], из ко-

---

[1] Горизонтальные рамки служат для получения горизонтальной поляризации волны. Это уменьшает помехи за счет отражений от местных предметов.

торых четыре расположены по углам квадрата, а пятая — в центре. Каждая из рамок в горизонтальной плоскости обладает ненаправленной диаграммой, т. е. эквивалентна вертикальной антенне. Результирующая диаграмма излучения всей антенной системы в горизонтальной плоскости имеет вид кардиоиды. Для вращения диаграммы используется гониометр, соединенный с рамками, расположенными по углам. Ротор гониометра вращается электродвигателем. Точность определения направления на радиомаяк составляет 1,5°, дальность действия около 200 *км*.



Фиг. 31. Антенное устройство УКВ радиомаяка.

Интересной разновидностью всенаправленных радиомаяков является радиомаяк на длинных волнах, предложенный Л. Е. Штилерманом. Радиомаяк имеет антенную систему, состоящую из трех антенн, питаемых так, что диаграмма излучения, имеющая весьма сложную форму, перемещается в пространстве. Во время работы маяка передатчик манипулируется ключом. Маяк излучает точки и тире. Полный цикл работы радиомаяка включает передачу 60 знаков. Принцип определения направления на радиомаяк основан на том, что количество точек и тире, прослушиваемых на различных направлениях, оказывается неодинаковым. Например, на одном из направлений прослушивается 30 точек и 30 тире, на другом направлении — 20 точек и 40 тире и т. д. Таким образом, принимая на корабле сигналы радиомаяка и подсчитывая количество точек и тире, можно определить направление на радиомаяк. Существенным достоинством подобного радиомаяка является большая точность определения направления, доходящая до 0,2—0,5°. Маяк имеет дальность действия около 2 500 *км*. Однако сложность отсчета направления и неоднозначность отсчета являются большим недостатком этого радиомаяка.

Мы рассмотрели различные типы используемых в настоящее время радиопеленгаторов и радиомаяков. Все они решают одну задачу. Однако каждый из рассмотренных типов имеет свои достоинства и недостатки, так что выбор оборудования определяется характером поставленных задач, а также наличием той или иной радионавигационной установки на самолете и корабле.

Так, например, для определения места с помощью наземных радиопеленгаторов на самолете и корабле не требуется специального радионавигационного оборудования. Нужна лишь связная радиостанция. Точность определения места может быть достаточно высокой. Вместе с тем пропускная способность такой системы мала, и требуется многочисленный квалифицированный персонал. С другой стороны, при пеленговании наземной радиостанции с помощью самолетного радиопеленгатора пропускная способность неограничена, и организация наземной службы значительно проще. Однако требуется специальное самолетное оборудование, а штурману самолета приходится заниматься пеленгованием и производить связанные с этим расчеты. Кроме того, при определении места необходимо пользоваться показаниями магнитного компаса.

Некоторые типы радиомаяков (равносигнальные, работающие пеленгом), так же как наземные радиопеленгаторы, не требуют специального оборудования на самолете. Пропускная способность их неограниченна. В отличие от самолетных радиопеленгаторов для определения места не требуется магнитного компаса. Наряду с этим существенным недостатком радиомаяков, требующих слуховой индикации, является необходимость длительное время прослушивать сигналы радиомаяка при определении направления. Точность таких маяков тоже, как правило, невелика. Этим в значительной степени объясняется то, что упомянутые радиомаяки применяются в последнее время редко.

ДАЛЬНОМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотренные выше радионавигационные системы основаны на измерении углов. Поэтому они называются угломерными. Существенным недостатком этих систем является недостаточная точность на большом расстоянии от радионавигационной станции.

Обычно ошибка при определении направления в угломерной системе имеет порядок 1—2°. Например, при угло-

вой ошибке в 2° ошибка в определении места (линейная ошибка) на расстоянии 50 *км* от радионавигационной станции равна 1,8 *км*, а на расстоянии 500 *км* равна 18 *км*. Таким образом, с увеличением расстояния линейная ошибка определения места сильно увеличивается.

Гораздо меньше указанный недостаток проявляется в дальномерных системах. Для уяснения принципа действия этих систем рассмотрим в общем виде определение места корабля или самолета на карте.

Пусть в какой-либо точке расположен самолет или корабль. Эту точку можно определить по пересечению двух линий — так называемых линий положения. Линия положения характеризуется тем, что все ее точки обладают каким-либо одним и тем же свойством. Это свойство фиксируется соответствующим навигационным прибором. Поэтому при движении по одной линии положения показание прибора не изменяется. Например, если самолет летит так, что показания наземного радиопеленгатора остаются неизменными, то он летит по прямой, проходящей через радиопеленгатор. Таким образом, в угломерных системах линией положения является прямая. Для определения места требуется определить точку пересечения двух прямых, проходящих через два наземных радиопеленгатора.

Точно так же при определении положения какой-либо точки на земной поверхности по широте и долготе пользуются пересечением двух линий положения: параллелей и меридианов.

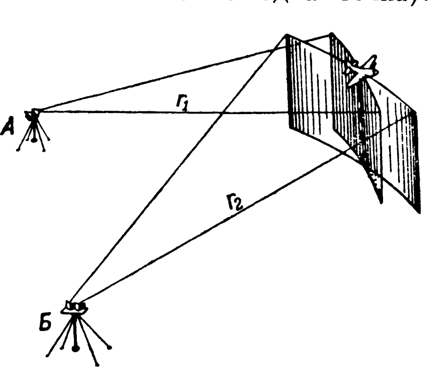
В радионавигации, кроме прямых линий, в качестве линий положения используются окружности и гиперболы. Соответствующие системы называются круговыми и гиперболическими. Они коренным образом отличаются от угломерных систем тем, что линия положения определяется не по углу, а по расстоянию или разности расстояний и относятся, поэтому, к группе дальномерных систем. Основным их достоинством является большая точность в определении места даже на больших расстояниях.

Перейдем к более подробному рассмотрению этих систем.

ИМПУЛЬСНАЯ КРУГОВАЯ СИСТЕМА

Выше упоминалось о системе А. Щенсновича. Идея ее в принципе не отличается от применяемых в настоящее время круговых систем. Различие лишь в техническом оформлении.

В круговых системах радионавигации место корабля или самолета определяется по двум известным расстояниям между кораблем или самолетом и двумя точками на земле *А* и *Б* (фиг. 32), положения которых на карте известны. Действительно, зная расстояния r_1 и r_2, можно из точек *А* и *Б* провести окружности радиусом r_1 и r_2; точки пересечения окружностей отметят на карте место самолета или корабля. Одна из этих точек дает действительное место, другая — ложное (на фиг. 32 показана только одна точка). Однако на практике ложное место легко бывает исключить из рассмотрения.



Фиг. 32. Определение места в круговой системе.

В импульсных круговых системах расстояние между самолетом или кораблем и точками *А* и *Б* вычисляется по времени распространения радиоволны между самолетом и этими точками. Так, $r_1 = c \cdot t_1$ и $r_2 = c \cdot t_2$, где c — скорость распространения радиоволн в воздухе ($c = 300\,000$ *км/сек*); t_1 и t_2 — время распространения радиоволн между самолетом и точками *А* и *Б*.

Познакомимся в общих чертах с одной из круговых импульсных систем, применяющейся в самолетовождении на близкие расстояния (до 400—500 *км*). Система состоит из самолетного и наземного оборудования. В состав самолетного оборудования входят: передающее устройство, приемник, антенны и индикаторное устройство. Передающее устройство вырабатывает короткие импульсы электромагнитной энергии, которые излучаются по всем направлениям с помощью ненаправленной антенны. Приемник, как обычно, служит для усиления приходящих сигналов, а индикаторное устройство предназначено для точного измерения времени и отсчета расстояний. В состав наземного оборудования входят две станции, устанавливаемые в точках *А* и *Б* (фиг. 32). Основными элементами наземной станции являются приемно-передающее устройство и антенны. При этом передатчик запускается напряжением с выхода приемника.

Общая схема работы системы такова. Импульс электромагнитной энергии, излученный самолетным устройством, доходя до наземной станции *А*, усиливается здесь и вызывает ответное излучение импульса наземной станции. Ответный импульс станции *А* принимается самолетным устройством. Индикаторная часть самолетной станции определяет с большой точностью время между началом излучения собственного импульса и моментом прихода ответного импульса от станции *А*. Зная это время, нетрудно вычислить расстояние от самолета до станции *А*. Обычно индикаторное устройство дает отсчет расстояния непосредственно в километрах. Таким же образом, определяется расстояние до наземной станции *Б*.

Для того чтобы наземная станция отвечала только на те импульсы, которые предназначены для нее, передатчик самолетной станции излучает импульсы на двух частотах, немного отличающихся друг от друга. Приемники наземных станций настраиваются каждый на соответствующую частоту. Место самолета, как уже отмечалось выше, определяется как точка пересечения на карте двух окружностей, проведенных из точек *А* и *Б* радиусами r_1 и r_2, величина которых отсчитывается по индикатору.

Для устранения двухзначности при определении места в наземных станциях используются антенны направленного действия. Каждая из них облучает сектор в пределах около 70°. Таким образом, две станции *А* и *Б* перекрывают не все пространство вокруг станций, а только некоторую рабочую зону. При определении места самолета ложная точка всегда оказывается вне рабочей зоны.

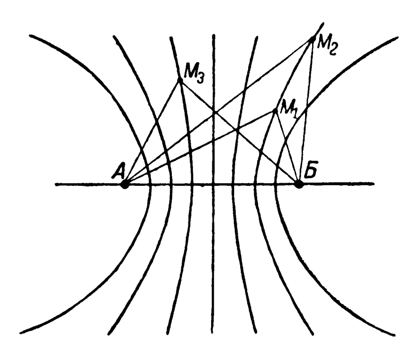
Подобная радионавигационная система позволяет также при наличии дополнительного устройства автоматически определять путевую скорость самолета (скорость самолета относительно земли), выходить с большой точностью к месту назначения, производить контроль пути и т. д.

Система работает в диапазоне УКВ; в соответствии с этим ее дальность действия не превосходит расстояния прямой видимости, а для самолета не превышает 400—500 *км*. Точность определения места весьма велика. Так, например, на средних расстояниях место самолета определяется с ошибкой порядка ± 20 *м*.

Существенным недостатком рассмотренной системы являются ее ограниченная дальность действия и малая пропускная способность.

ИМПУЛЬСНАЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Импульсный гиперболический метод радионавигации, впервые предложенный в 1938 г. советским инженером Э. М. Рубчинским, позволяет определить место корабля или самолета по известным разностям расстояний между кораблем или самолетом и двумя парами наземных станций. Гиперболическим метод называется потому, что место на карте определяется в точке пересечения гипербол. Гиперболой, как известно, называется кривая, все точки которой имеют одинаковую разность расстояния до двух известных точек, называемых фокусами (точки *А* и *Б* на фиг. 33 — фокусы гиперболы).



Фиг. 33. Семейство гипербол.

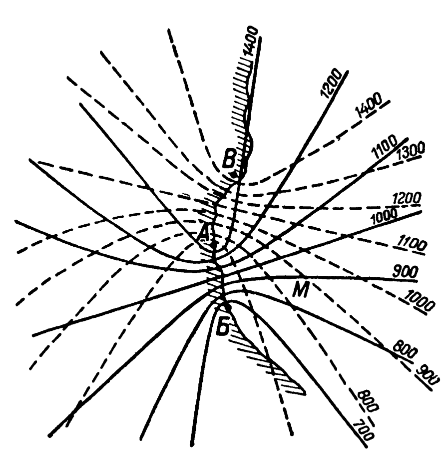
Рассмотрим точку M_1, лежащую на гиперболе. Расстояния этой точки до фокусов *А* и *Б* равны AM_1 и $БM_1$. Пусть, например, $AM_1 = 50$ *км*, а $БM_1 = 30$ *км*. Тогда разность этих расстояний $\Delta r_1 = AM_1 - БM_1 = 50-30=20$ *км*. Точка M_2 той же гиперболы удалена от фокусов на большие расстояния, например $AM_2 = 80$ *км*, а $БM_2 = 60$ *км*. Однако разность этих расстояний $\Delta r_2 = AM_2 - БM_2 = 80-60 = 20$ *км* не изменяется.

Таким образом, гипербола является линией одинаковой разности расстояний между точками *М* и двумя данными точками *А* и *Б*. В рассматриваемом случае эта постоянная разность расстояний $\Delta r = 20$ *км*.

Для другой гиперболы (фиг. 33) постоянная разность расстояний будет, например, 10 *км*. Перпендикуляр, проведенный через середину линии *АБ*, можно также рассматривать как гиперболу с разностью расстояний $\Delta r = 0$. Дейст-

вительно, любая точка, лежащая на этом перпендикуляре, отстоит на одинаковом расстоянии от точек *А* и *Б*, и следовательно, разность расстояний равна нулю.

Гиперболам, находящимся левее перпендикуляра, следует приписать отрицательные значения разности расстояний, так как *АМ* меньше *БМ* (например, $АМ_3$ меньше $БМ_3$). Гиперболы, построенные для различных разностей расстояний относительно выбранных точек *А* и *Б*, образуют так называемое семейство гипербол.



Фиг. 34. Определение места по пересечению гипербол.

При гиперболическом методе радионавигации используются географические карты, на которых заранее нанесены два семейства гипербол, построенные около двух пар известных точек *АБ* и *АВ* (фиг. 34). Построение ведется с учетом того, что земля не является плоскостью. Гиперболы разных семейств обозначают различными цветами. Например, гиперболы, построенные около точек *А* и *Б*, наносят красным цветом; гиперболы, построенные около точек *А* и *В*,— зеленым цветом.

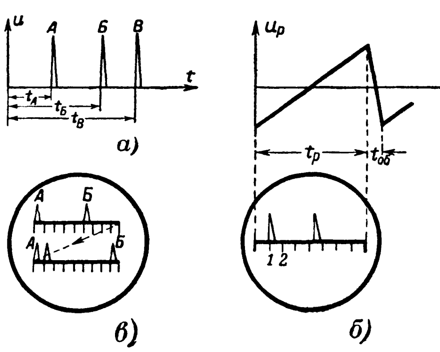
На каждой гиперболе отмечена соответствующая ей разность расстояний или чаще всего указывается так называемая задержка, соответствующая этой разности (об этом см. ниже).

Для определения места корабля *М* штурман должен определить две разности расстояний: между кораблем и точками *А* и *Б* и между кораблем и точками *А* и *В*. Первая разность расстояний позволяет выбрать одну из красных гипербол, на которой находится корабль. По второй разности расстояний отыскивается соответствующая гипербола зеленого цвета, на которой также находится корабль. Место корабля находится в месте пересечения найденных гипербол.

Для определения разности расстояний используются наземные передающие станции, расположенные в точках *А*,

Б и *В*, и корабельное или самолетное приемно-индикаторное устройство.

Принцип определения разности расстояний заключается в следующем. Наземная станция *А* излучает во всех направлениях импульсы электромагнитной энергии, которые, дойдя до станций *Б* и *В*, вызывают излучение этими станциями своих импульсов. Станция *А* называется ведущей, а станции *Б* и *В* — ведомыми. Ведомые станции устроены таким образом, что их импульсы излучаются с определенной постоянной задержкой по времени δ относительно момента прихода импульса от ведущей станции. Излученные импульсы трех станций — *А*, *Б* и *В*—в некоторые моменты достигают корабля.



Фиг. 35. Отсчет задержек в импульсной гиперболической системе радионавигации.

Приемно-индикаторное устройство на корабле фиксирует момент прихода этих импульсов и определяет время между приходом импульса от станции *А* и импульсов от станций *Б* и *В*. На фиг. 35,*а* отмечены моменты появления импульсов от станций *А*, *Б* и *В* на выходе приемно-индикаторного устройства. За исходный моменг времени принят момент излучения импульса ведущей станции *А*. Приемно-индикаторное устройство определяет время $t_{БА}=t_Б-t_А$ и $t_{ВА}=t_В-t_А$. Будем называть эти отрезки времени задержками. Определим, как зависят эти задержки от расстояний между кораблем и наземными станциями. Задержка $t_{БА}$ определяется следующим образом. Время $t_Б$ между моментом излучения импульса станцией *А* и моментом прихода на корабль импульса от станции *Б* складывается из трех частей:

1) времени распространения импульса станции *А* до станции *Б*, равного $\frac{АБ}{c}$, где *c*—скорость света в воздухе;

2) постоянной задержки излучения импульса станции *Б*—времени δ;

3) времени распространения импульса станции $Б$ до корабля, равного $\frac{БМ}{c}$.

Таким образом, $t_Б = \frac{АБ}{c} + \delta + \frac{БМ}{c}$.

Время t_A между моментом излучения импульса станции A и моментом прихода этого импульса на корабль равно, очевидно, $\frac{АМ}{c}$. Задержка импульса от станции $Б$ относительно импульса от станции A на корабле, определяемая приемно-индикаторным устройством, равна:

$$t_{АБ} = t_Б - t_A = \frac{АБ}{c} + \delta + \frac{БМ}{c} - \frac{АМ}{c} =$$

$$= \left(\frac{АБ}{c} + \delta\right) + \frac{1}{c}\,(БМ - АМ).$$

Так как величины $АБ$, δ и c постоянны и для данной навигационной системы известны, то, измерив задержку сигналов $t_{БА}$, можно вычислить разность расстояний ($БМ$—$АМ$) между кораблем и станциями A и $Б$. Аналогично определяется разность расстояний до станций A и $В$. По вычисленным разностям можно легко найти на карте соответствующие гиперболы красного и зеленого цветов. Для облегчения работы штурмана гиперболы на карте отмечаются не разностью расстояний, для которой построена гипербола, а той задержкой, которая будет наблюдаться на корабле, когда корабль находится на этой гиперболе. Отсчитав по приемно-индикаторному устройству две задержки, штурман, не производя никаких дополнительных вычислений, находит соответствующие этим задержкам красную и зеленую гиперболы и определяет место корабля в точке их пересечения.

Познакомимся теперь с принципом действия приемно-индикаторного устройства. Приемно-индикаторное устройство состоит из приемной антенны, приемника и индикатора. Одним из основных элементов индикатора является электронно-лучевая трубка, с помощью которой фиксируются моменты прихода импульсов, а также определяются соответствующие задержки. Электронно-лучевая трубка является своего рода секундомером. Рассмотрим принцип действия такого электронного секундомера.

Если на управляющие пластины электронно-лучевой трубки подавать изменяющиеся по времени напряжения, то

электронный луч и пятно на экране будут находиться в движении. Это движение называется разверткой, а напряжение, вызывающее отклонение луча,— развертывающим напряжением. Линия, по которой перемещается пятно, носит название линии развертки.

Пусть на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подается изменяющееся напряжение, как показано на фиг. 35,*б* (так называемое пилообразное напряжение). В момент времени $t=0$ на горизонтально отклоняющие пластины подается максимальное отрицательное напряжение, и пятно на экране находится у левого края. С момента $t=0$ до момента t_p напряжение равномерно увеличивается, и пятно по экрану перемещается равномерно по прямой вправо. В момент t_p пятно находится у правого края экрана. Затем, напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах быстро спадает до исходного значения, и пятно с большой скоростью возвращается в начальное положение у левого края экрана, после чего процесс начинается снова.

Время, в течение которого пятно равномерно перемещается слева направо, называется временем рабочего хода; время возвращения пятна называется временем обратного хода. Время одного цикла изменения напряжения $t_ц=t_p+t_{об}$. Величина $F=\frac{1}{t_ц}$ называется частотой развертывающего напряжения.

Если во время рабочего хода на вертикально отклоняющие пластины подавать кратковременные импульсы напряжения, то на экране появятся вертикальные выбросы. Место выброса на экране определяется временем, которое прошло от момента начала развертки до момента появления выброса. Например, если это время равно 100 *мксек* (1 *мксек* = = 0,000001 сек), то выброс будет находиться в точке *1*, если оно равно 200 *мксек*,— то в точке *2*, и т. д. Следовательно, длина линии развертки от ее начала до вертикального выброса представляет в некотором масштабе указанное время.

Для того чтобы проградуировать экран в единицах времени, на вертикально отклоняющие пластины подается серия импульсов, следующих друг за другом через определенные промежутки времени, например через 100 *мксек*, причем первый импульс поступает одновременно с началом развертки. Эти импульсы вызывают выбросы

в соответствующих местах экрана, деля линию развертки на части. Около каждого выброса можно отметить время его появления после начала развертки. Масштабные выбросы обычно обращены для удобства отсчета вниз (соответственно полярность импульсов выбирается отрицательной). Таким образом, картина на экране представляет собой светящийся циферблат электронных часов. Чтобы не было видно мельканий, которые могут возникнуть при наложении одного цикла развертки на другой, частоту развертывающего напряжения выбирают достаточно большой (больше 15 циклов в секунду). Генератор развертывающего напряжения и генератор масштабных импульсов входят в схему индикатора.

Импульсы, принятые от станций *А*, *Б* и *В*, усиливаются приемником, детектируются и подаются на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки в виде импульсов положительной полярности. В момент прихода импульса от соответствующей станции на линии развертки появляется вертикальный выброс. Однако, для того чтобы этот выброс был неподвижным, необходимо, чтобы каждый последующий импульс станции давал выброс в одном и том же месте линии развертки. Очевидно, такое совпадение будет лишь в том случае, если частота развертки совпадает с частотой повторения импульсов станции или ей кратна. Генератор развертки устроен так, что его частоту можно изменять. Таким образом, меняя частоту генератора развертки, можно добиться совпадения частоты повторения импульсов станции и частоты развертки, или, как говорят, добиться синхронизации. Если развертка синхронизирована с работой наземной станции, то импульсы в этих станциях видны неподвижными на экране электронно-лучевой трубки. С помощью масштабных импульсов определяется время между моментами прихода на корабль импульсов от станций *Б* и *А* или *В* и *А*, т. е. задержки сигналов.

Мы познакомились с общим принципом действия импульсной гиперболической системы радионавигации. Познакомимся теперь в общих чертах с одной из гиперболических систем, применяющейся в диапазоне УКВ. Наземное оборудование системы состоит из трех станций — *А*, *Б* и *В*, — разнесенных друг от друга на расстоянии 80—150 *км*. Ведущая станция *А* излучает импульсы с частотой повторения 500 *имп/сек* (длительность импульса 2 *мксек*). Ведомая станция *Б* отвечает только на четные импульсы ведущей станции, а ведомая станция *В* отвечает на нечетные им-

пульсы. Нечетные импульсы станции *А* излучаются сдвоенными, т. е. импульсы станции *В* следуют за сдвоенными импульсами. Кроме того, частота повторения ведомых станций в два раза меньше частоты повторения ведущей, т. е. равна 250 *имп/сек*. На ведомых станциях искусственно вводится постоянная задержка ответных импульсов на время δ.

Самолетное оборудование системы состоит из приемно-индикаторного устройства. Частота развертки выбрана 250 циклов в секунду. Особенностью развертки является то, что линия развертки состоит из двух половин, одна из которых лежит выше диаметра электронно-лучевой трубки, а другая — ниже. Пятно на экране проходит путь, указанный на фиг. 35,*в*. Участок, показанный пунктирной линией, пятно проходит быстро. Таким образом, верхняя и нижняя части развертки пробегаются пятном за $^1/_{500}$ сек. Частоты развертывающего напряжения можно в некоторых пределах менять.

При синхронизации индикаторного устройства с работой наземных станций импульсы этих станций будут видны на экране неподвижными. Импульс ведущей станции *А* будет виден и на верхней, и на нижней частях развертки. Нижний импульс является сдвоенным.

Импульс от станции *Б* располагается на верхней части развертки, импульс от станции *В* — на нижней (там же виден двойной импульс от станции *А*). Задержки сигналов отсчитываются по масштабным импульсам. Задержка сигнала от станций *Б* и *А* отсчитывается по верхней линии развертки, задержка сигналов от станций *В* и *А* — по нижней линии.

Для того чтобы интервал времени между импульсами станций *А* и *Б* или *А* и *В* при приходе их на самолет не был очень малым, что затруднило бы отсчет, в ведомые станции вводится упоминавшаяся уже раньше постоянная задержка ответных импульсов на время δ.

В других импульсных гиперболических системах схема работы наземных станций и самолетного приемно-индикаторного устройства несколько отличается от описанного. Ведущая станция *А* работает на двух частотах повторения импульсов: одна частота используется для работы с ведомой станцией *Б*, другая — для работы с ведомой станцией *В*. Таким образом, получается независимая работа двух пар станций — *А* и *Б* и *А* и *В*. Для определения задержек самолетно-индикаторное устройство вначале синхронизи-

руется с работой первой пары станций (*А* и *Б*), а затем — с работой второй пары станций (*А* и *В*). При каждой отдельной синхронизации производится один отсчет.

Дальность действия импульсно-гиперболической системы зависит от выбранного диапазона волн. Так, например, на УКВ дальность действия ограничивается дальностью распространения УКВ и для высоко летящих самолетов не превосходит 500—600 *км*. На коротких волнах дальность действия системы значительно возрастает. Так, при использовании на коротких волнах пространственной волны, отраженной от ионизированных слоев, дальность действия системы достигает 2 400 *км*. Однако пространственный луч устойчив только ночью, так что указанная дальность относится к работе системы в ночное время. При работе поверхностной волной (днем) дальность действия значительно меньше.

Для обеспечения большой дальности действия системы применяется импульсная гиперболическая система, работающая в диапазоне средних волн. Дальность действия такой системы около 2 400 *км* в любое время суток.

Точность определения расчетного места корабля или самолета при импульсной гиперболической системе радионавигации зависит от удаления от базовой линии (линия *АБ*) и перпендикуляра к середине базовой линии (гиперболическая сетка при больших удалениях редеет, и сами гиперболы пересекаются под неблагоприятными углами[1]). Однако на большой площади ошибка в определении места не превосходит 1—2% от расстояния. Таким образом, при удалении от наземной станции на 2 000 *км* ошибка в определении места составит всего 20 *км*, что является хорошей точностью. Достоинством импульсной гиперболической системы являются ее неограниченная пропускная способность, а также значительная помехоустойчивость

Наземные устройства рассмотренных систем весьма громоздки. Так, например, антенна на средних волнах подвешивается на башне высотой около 40 *м*; мощность излучения в импульсе достигает сотен киловатт. Приемно-индикаторное устройство, наоборот, очень компактно и в некоторых образцах аппаратуры имеет вес лишь 16 *кг*. Следует еще упомянуть, что обслуживание наземных станций требует высококвалифицированного персонала.

---

[1] Наибольшая точность определения места получается при пересечении гипербол под углом 90°.

ФАЗОВЫЕ СИСТЕМЫ

Выше были рассмотрены круговая система, в которой расстояние измеряется импульсным методом, и гиперболическая система, где этим же методом измеряется разность расстояний. Однако, задолго до появления импульсных систем советскими учеными Л. И. Мандельштамом, Н. Д. Папалекси, Е. Я. Щеголевым и др. были созданы круговая и гиперболическая системы, в которых расстояние и разность расстояний измеряются фазовыми методами.

Начиная с 1931—1932 гг. и в последующие годы, под руководством этих ученых велись исследования распространения электромагнитных волн вдоль земной поверхности. Исследования имели целью, с одной стороны, выяснить ряд неизвестных вопросов (в частности, точно измерить скорость распространения радиоволн) и, с другой стороны, разработать метод измерения расстояния при помощи радиоволн.

Результатом работ, которые выполнялись в различных учреждениях и экспедициях, явилась детальная разработка фазовых методов измерения расстояния и разности расстояний. Эти методы часто называют так, как их назвали авторы, — радиоинтерференционными методами. За создание радиоинтерференционного метода Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси были удостоены в 1942 г. Сталинской премии первой степени.

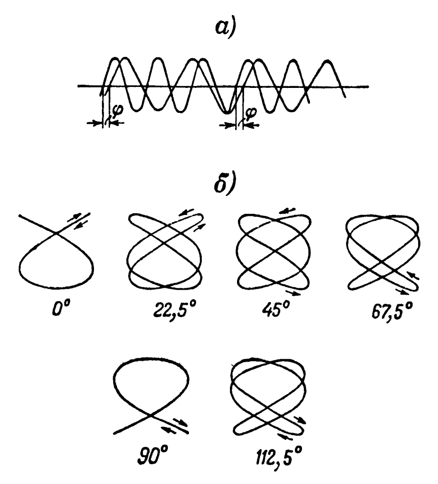
Термин радиоинтерференция возник по аналогии с оптикой. Явление интерференции возникает, когда два луча света от одного источника, пройдя разные пути, затем взаимодействуют между собой. При изменении разности хода этих лучей, т. е. разности фаз между колебаниями, лучи усиливают (если разность хода равна одной или нескольким длинам волн) или ослабляют друг друга (если разность хода равна одной или вообще нечетному числу полуволн).

Из всех вариантов радиоинтерференционного метода наибольшее значение приобрели: 1) метод передвижения (метод радиолага); 2) метод изменения частоты (метод радиодальномера) и 3) метод фазового зонда.

Метод передвижения полностью аналогичен оптическому интерферометру. Он впервые был испробован на море и поэтому получил название радиолага. Радиолаг состоит из двух приемно-передающих радиостанций. Одна устанавливается на берегу, а вторая — на движущемся корабле. Ко-

рабельная радиостанция называется задающей, а береговая — отражающей.

Задающая станция, работающая на определенной частоте (высокочастотный генератор стабилизирован кварцем), излучает колебания, которые попадают в приемник отражающей станции. Назначение отражающей станции — вернуть колебания снова к задающей станции, с тем чтобы измерить запаздывание на этем пути. Для этого усиленные в приемнике колебания задающей станции управляют дейст-



Фиг. 36. Измерение сдвига фаз при отношении частот $^2/_3$.

вием передатчика отражающей станции. Определение запаздывания колебаний, возвратившихся с отражающей станции, производится путем измерения разности фаз между этими колебаниями и колебаниями задающей станции. Чтобы сделать это, надо колебания разделить. Это, однако, очень трудно при одинаковой частоте. Поэтому в отражающей станции применяется трансформация частоты, т. е. изменение ее в определенном отношении, обычно на частоте $^2/_3$ от частоты задающей станции. Как показал Е. Я. Щеголев, два колебания, частоты которых находятся в отношении $^2/_3$, также могут быть сравниваемы между собой по фазе, как при двух колебаниях одной и той же частоты (фиг. 36,*а*).

Легко понять, что разность фаз между колебаниями зависит от величины перемещения задающей станции из не-

которого начального положения. При движении задающей станции разность фаз меняется непрерывно. Измерение этой разности фаз производится с помощью электронного осциллографа: колебания подаются на обе пары отклоняющих пластин; в результате на экране получается так называемая фигура Лиссажу. При изменении пройденного расстояния меняется разность фаз, и фигура на экране осциллографа последовательно принимает различные очертания (фиг. 36,*б*). Этот метод не вполне удобен. Особенно утомительно отсчитывать целые фазовые циклы (т. е. одно полное изменение разности фаз на 360°). Впоследствии использовались специальные счетчики фазовых циклов, которые проделывают такую операцию автоматически.

После перемещения задающей станции из начального в конечное положение известно полное изменение разности фаз, соответствующее данному расстоянию. Кроме того, известно, какому изменению расстояния соответствует один фазовый цикл. Отсюда легко определить пройденное расстояние. Этот способ измерения разности расстояний дает точность, недоступную импульсному методу; ошибка на расстояниях в десятки километров имеет порядок долей метра.

Большую роль в развитии фазовых методов сыграл метод изменения частоты, в частности целая серия радиодальномеров МПЩ (Мандельштама, Папалекси, Щеголева). С помощью радиодальномера можно измерить расстояние между двумя пунктами. При этом в каждом пункте устанавливается приемно-передающая радиостанция. Как и в методе радиолага, одна из станций является задающей, а вторая — отражающей.

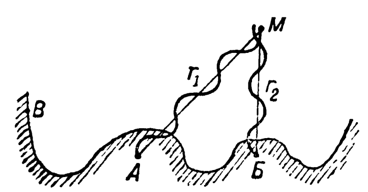
Однако здесь имеется коренное отличие от метода радиолага. В радиолаге разность фаз колебаний задающей и отражающей станций изменялась вследствие движения задающей станции.

В радиодальномере же производят плавное изменение частоты передатчика от определенного начального значения до определенного конечного значения, и обратно (простейший способ получения такого изменения частоты — вращение ротора переменного конденсатора в контуре передатчика). Одновременно синхронно меняется частота отражающей станции, так что отношение частот передатчиков этих станций сохраняется неизменным (например, равно $^2/_3$, как в методе радиолага). Между колебаниями задающей и от-

ражающей станций имеется определенная разность фаз. Эта разность фаз прямо пропорциональна расстоянию между ними. Измеряется она так же, как в радиолаге.

В радиолаге и радиодальномере использовались волны длиной 200—600 *м*. Бóльшую точность можно получить при работе на коротких и ультракоротких волнах.

Дальномер, состоящий из двух станций, не дает возможности определить место корабля. Для этого используется круговая система, состоящая из задающей и двух отражающих станций, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.



Фиг. 37. Определение разности расстояния по разности фаз.

Во время войны англичанами была применена фазовая гиперболическая система «Декка». Эта система сконструирована целиком и полностью на основе третьего радиоинтерференционного метода, разработанного советскими учеными,— фазового зонда.

В системе фазовый зонд, как и в импульсной гиперболической системе, имеются три передающих устройства. Все они непрерывно излучают незатухающие колебания.

На фиг. 37 эти станции расположены в точках *A*, *Б* и *B*. Станция в точке *A* является главной. Пусть в точке *M* находится корабль или самолет. Тогда разность фаз колебаний, поступающих от станций *A* и *Б* в точку *M*, будет зависеть от разности расстояний этих точек (при постоянной начальной разности фаз колебаний между передатчиками). В самом деле, если считать начальную разность фаз колебаний передатчиков *A* и *Б* равной нулю, то сдвиг фаз этих колебаний в точке *M* объясняется лишь тем, что колебания прошли разные пути r_1 и r_2 ($r_1 = AM$, а $r_2 = БM$). В случае $r_1 = r_2$ сдвиг фаз остался бы равным нулю.

Целый фазовый цикл (сдвиг фаз в градусах равен 360°) соответствует прохождению волной расстояния в одну дли-

ну волны. Следовательно, фазовый угол, соответствующий прохождению расстояния r и выраженный в градусах равен

$$\varphi^\circ = 360 \cdot \frac{r}{\lambda},$$

где λ — длина волны.

В нашем случае разность фаз колебаний от станций A и $Б$ в точке M равна

$$\varphi^\circ = 360 \frac{r_1}{\lambda} - 360 \frac{r_2}{\lambda} = \frac{360}{\lambda} (r_1 - r_2).$$

Точно так же разность фаз колебаний от станций A и B определяется разностью расстояний до этих станций. Отсюда следует, что местоположение самолета или корабля можно определить по пересечению двух гипербол, соответствующих равной разности фаз приема сигналов от станций A—$Б$ и A—B.

Рассмотрим, с какой точностью определяется место в фазовом методе. Разность фаз можно измерить с точностью до 1°, т. е. с точностью до 1/360 периода. Пусть $\lambda = 300$ *м*. При этом период $T = 1/1\,000\,000$ сек., и следовательно, разность времени прихода радиоволн от двух станций определяется с точностью до 1/360 000 000 сек. За это время волна продвинется на расстояние 83 *см*. Очевидно, что при укорочении длины волны точность метода возрастает.

До сих пор мы полагали, что все три станции работают на одной частоте. Но если это так, то сигналы нельзя разделить приемником для сравнения фаз. Поэтому частоты передатчиков, так же как в описанных выше. методах должны находиться в определенном отношении. Следует иметь в виду, кроме того, что разность фаз колебаний от двух станций состоит из некоторого числа полных фазовых циклов и определенной части цикла. Чтобы определить линии положения в гиперболической сетке, нужно знать обе величины.

Приемное устройство, устанавливаемое на корабле или самолете, является «фазовым зондом». Фазовый зонд состоит из трех приемников (для приема трех станций) и двух пар фазоизмерительных приборов. С помощью этих приборов измеряется разность фаз между колебаниями от главного и двух других передатчиков. Каждая пара фазоизмерительных приборов состоит из фазометра для измерения части фазового цикла и фазоиндикатора для измерения чис-

ла целых фазовых циклов. Фазометр определяет множество линий положения, отличающихся целыми фазовыми циклами. Чтобы устранить многозначность, необходимо определить начальное положение корабля или самолета на карте и затем фиксировать количество линий положения, пройденных от начального положения. Для этого на карте отмечается начальное положение корабля в том месте, где это удобно сделать нерадиотехническими методами (например, при отплытии корабля из порта). Далее, во время плавания счетчики фазовых циклов — фазоиндикаторы — отмечают изменения целого числа фазовых циклов, а фазометры отмечают части циклов.

Для облегчения пользования фазоизмерительными приборами шкалы соответствующих пар фазоиндикаторов и фазометров окрашены в красный и зеленый цвета, соответствующие окраске линий положения, нанесенных на карте.

Для большей точности в фазовом зонде используется диапазон 200—500 *м*. При этом получается точность поразительная для радионавигационных систем. Например, когда корабль швартуется в одном и том же месте пристани разными бортами, то при несимметричном расположении антенны прибор отмечает смещение местоположения. Однако в указанном диапазоне, особенно на больших расстояних, сказывается вредное влияние ионосферных лучей, вносящих искажение в фазовые соотношения.

Системы с дальностью действия в несколько тысяч километров работают, как правило, на длинных волнах. При этом все же в ночное время сохраняются ошибки, которые растут с расстоянием. Наличие этих ошибок и является основным недостатком фазовой системы.

РАДИОВЫСОТОМЕР

В полете очень важно знать высоту самолета над местностью. Знание высоты особенно важно при пробивании самолетом облаков в плохую погоду, когда летчик не видит земли. Несмотря на это, до сравнительно недавнего времени на самолете не было высотомера, измеряющего расстояние до земли. Высотомер барометрического типа [1] измеряет вы-

---

[1] Определение высоты с помощью барометрического высотомера основано на том известном факте, что с подъемом на высоту давление воздуха падает. Таким образом, измеряя давление воздуха барометром, можно по его показаниям судить о высоте полета. Сам высотомер представляет собой барометр, отградуированный в метрах высоты.

соту недостаточно точно и, что самое важное, определяет не высоту самолета над местностью (истинную высоту), а высоту над уровнем моря или аэродрома, с которого взлетел самолет.

Только с развитием техники ультракоротких радиоволн стало возможным создание высотомера, лишенного указанных недостатков.

Радиовысотомер в отличие от барометрического высотомера показывает не относительную, а истинную высоту полета, причем измерение высоты производится с большой точностью.

Принцип действия радиовысотомера основан на явлении отражения радиоволн от земной поверхности. Высота самолета определяется при этом по времени прохождения радиоволн от самолета до земли и обратно. Это время может быть определено различными способами.

Один из способов заключается в том, что с помощью электронно-лучевой трубки определяется время между моментом излучения импульса и моментом возвращения его на самолет после отражения от земли (обычный импульсный метод, применяемый в радиолокации). Подобный метод используется для измерения больших высот. На малых высотах благодаря недостаточной точности и наличию так называемой «мертвой зоны»[1] такой высотомер использоваться не может.

Поэтому в радиовысотомерах, для которых особенно важна большая точность отсчета и где высоту полета требуется определять почти от момента взлета, широкое распространение нашел метод частотной модуляции, впервые примененный советскими учеными Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси.

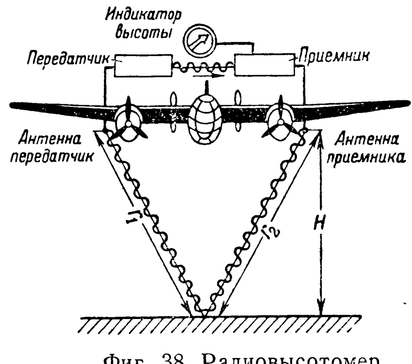
Познакомимся с работой такого радиовысотомера. Радиовысотомер (фиг. 38) состоит из передатчика, приемника, передающей и приемной антенн и прибора, по которому отсчитывается высота полета.

Передатчик работает в диапазоне УКВ модулированными по частоте колебаниями. Таким образом, частота передатчика не остается все время постоянной, а непрерывно изменяется. Частотная модуляция осуществляется тем, что с помощью специального устройства периодически изменяет-

[1] „Мертвой зоной" радиолокационной станции называется то минимальное расстояние от станции, при котором отраженный импульс еще не сливается с прямым.

ся величина емкости одного из конденсаторов, входящих в колебательный контур генератора УКВ.

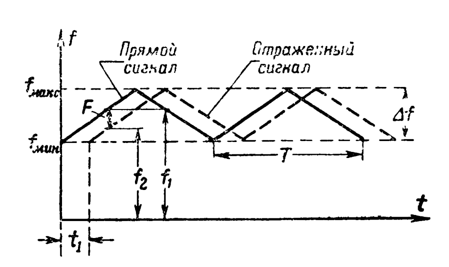
Зависимость частоты генератора УКВ от времени показана на фиг. 39, из которой видно, что частота генератора изменяется по пилообразному закону, достигая в отдельные моменты времени минимального и максимального значений.



Фиг. 38. Радиовысотомер.

Высокочастотное напряжение генератора УКВ подается по линии связи на вход приемника, а также подводится к передающей антенне (фиг. 38). Так как линия связи между передатчиком и приемником имеет очень небольшую длину, то можно считать, что напряжение от генератора УКВ на вход приемника подается мгновенно.

Излучаемые передающей антенной радиоволны отражаются от земли и возвращаются к приемной антенне, вызывая на входе приемника соответствующее напряжение.



Фиг. 39. Принцип действия радиовысотомера.

На входную цепь, приемника поступают, таким образом, два напряжения: напряжение от генератора УКВ (прямой сигнал) и напряжение, вызванное отраженной волной (отраженный сигнал).

Благодаря частотной модуляции эти сигналы имеют на входе приемника различную частоту. В самом деле, если в какой-то момент времени радиоволна, излучаемая передающей антенной, имеет частоту f_1, то когда эта волна после отражения от земли достигает входа приемника, частота прямого сигнала уже не будет равна f_1, так как за время движения отраженного сигнала до земли и обратно частота генератора успевает измениться. Разница в частотах пря-

мого и отраженного сигналов будет, очевидно, тем больше, чем больше время распространения отраженной волны и, следовательно, чем больше высота самолета над землей.

На фиг. 39 представлена зависимость частоты прямого и отраженного сигналов на входе приемника от времени. Из этой фигуры следует, что почти для любого момента времени частота прямого сигнала f_1 не равна частоте отраженного сигнала f_2, однако разность этих двух частот $F = f_1 - f_2$ остается при данной высоте полета постоянной.

Найдем зависимость разностной частоты F от высоты самолета над землей H.

Пусть время одного цикла изменения частоты генератора равно T и максимальное изменение частоты $\Delta f = f_{макс} - f_{мин}$. Тогда в единицу времени изменение частоты составит $\frac{\Delta f}{\frac{1}{2} T}$.

За время t_1 прохождения радиоволны от самолета до земли и обратно частота генератора успевает измениться на величину

$$F = \frac{\Delta f}{\frac{1}{2} T} \cdot t_1 = \frac{2\Delta f}{T} \cdot t_1.$$

Время t_1 определим, исходя из скорости распространения радиоволн в воздухе c и пройденного пути $r = r_1 + r_2$; очевидно, $t_1 = r/c$.

Практически наклонные пути r_1 и r_2 мало отличаются от высоты полета H, так что приближенно можно полагать, что $r_1 = r_2 \approx H$. Таким образом,

$$r = r_1 + r_2 = 2H \text{ и } t_1 = \frac{2H}{c}.$$

Подставляя значение $r = 2H$ в формулу разностной частоты, получим:

$$F = \frac{4\Delta f}{c \cdot T} \cdot H.$$

Из последней формулы следует, что для данного радиовысотомера с определенными Δf и T разностная частота F пропорциональна высоте полета. Определив разностную частоту F, можно определить высоту самолета над землей.

Значения разностной частоты и высоты полета определяются следующим образом. На входе приемника прямой и отраженный сигналы, имеющие различные частоты, создают биения. Результирующее высокочастотное напряжение на входе приемника имеет, следовательно, огибающую амплитуд, причем частота этой огибающей равна разности частот $F = f_1 - f_2$.

После детектирования на нагрузке детектора можно выделить напряжение частоты F. Это напряжение усиливается и поступает на вход так называемого частотомера.

Прибор, включенный в схему частотомера, указывает частоту входного напряжения. Так как частота входного напряжения F пропорциональна высоте полета, то прибор градуируется непосредственно в метрах высоты.

Радиовысотомер подобного типа совместно с другими приборами позволяет производить слепую посадку самолета.

СЛЕПАЯ ПОСАДКА САМОЛЕТА

Полет на большие расстояния протекает часто при различных метеорологических условиях. Иногда бывает так, что самолет, прилетев в район посадки и найдя аэродром закрытым облаками, вынужден либо возвращаться назад, либо искать новое место посадки, находящееся иногда на расстоянии нескольких сот километров от места назначения. Понятно, поэтому, какую большую роль должны играть устройства для слепой посадки самолетов.

Прежде чем рассмотреть системы слепой посадки самолета, познакомимся в общих чертах с посадкой самолетов при нормальных условиях видимости. Для взлета и посадки самолетов на аэродроме оборудуется специальная взлетно-посадочная полоса (ВПП). На больших аэродромах ВПП имеет искусственное покрытие (дерево, бетон и т. д.); начало ВПП находится на расстоянии нескольких сот метров от границы аэродрома.

Взлет и посадка самолетов являются одними из самых ответственных моментов полета и требуют от летчика большого внимания. За посадкой самолета наблюдает руководитель полета, который поддерживает с самолетом двустороннюю радиотелефонную связь и во время посадки дает летчику указания, как правильно выдерживать самолет.

Получив по радио разрешение на посадку, самолет подходит к аэродрому, делает над ним круг и затем выходит на направление ВПП. Некоторое время самолет летит на

высоте 300—400 *м* и, когда до аэродрома остается 4—5 *км*, начинает снижаться. Траектория снижения самолета называется глиссадой планирования.

Во время посадки летчик должен наблюдать за тем, чтобы самолет не отклонялся от направления на ВПП и, кроме того, чтобы снижение производилось с такой скоростью, при которой самолет проходит границу аэродрома на высоте 20—25 *м*. Если самолет отклоняется от нормальной глиссады или от направления на ВПП, руководитель полета командует: держать левее, правее, выше, ниже и т. д. Если все-таки летчик не сумел почему-либо правильно подвести самолет к аэродрому, то посадка запрещается, и самолет уходит на второй круг.

Таким образом, для совершения посадки летчику необходимо знать момент пролета того места, с которого начинается снижение; направление ВПП и уклонение самолета от этого направления; глиссаду планирования и отклонение от глиссады; момент пролета границы аэродрома. Современные системы слепой посадки позволяют летчику получить все эти данные.

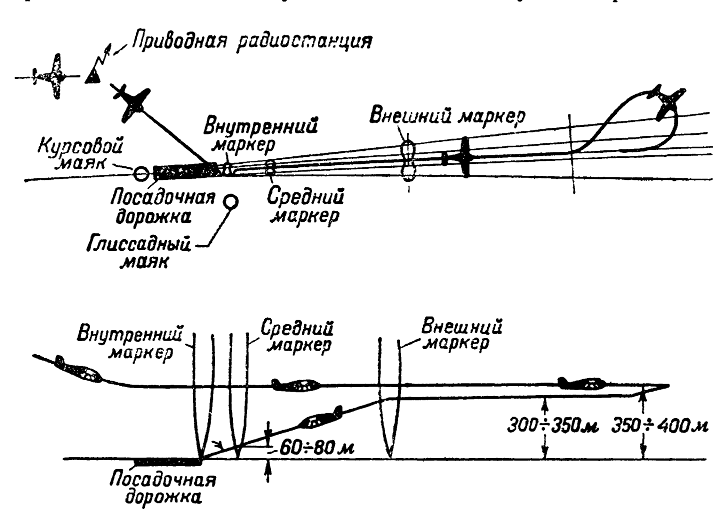
Слепая посадка самолета осуществляется различными методами. Познакомимся с одной из систем, с помощью которой летчик самостоятельно производит выход на посадку, не видя земли, по показаниям радиоприборов.

СЛЕПАЯ ПОСАДКА ПО РАДИОМАЯКАМ

На аэродроме устанавливается группа радиомаяков, которые позволяют летчику правильно выдерживать направление полета при посадке (курсовой маяк), правильно производить снижение самолета (глиссадный маяк) и, кроме того, фиксировать момент начала снижения и момент пролета границы аэродрома (маркерные маяки). На фиг. 40 показано расположение наземной радиоаппаратуры слепой посадки на аэродроме. Курсовой радиомаяк, устанавливаемый в направлении ВПП, представляет собой передающее устройство с антенной системой направленного действия. Антенная система состоит из нескольких разнесенных антенн. Высокочастотные колебания передатчика модулируются по амплитуде двумя частотами, например 90 и 150 *гц*.

При приеме сигнала от маяка можно на выходе приемника выделить напряжение частотой 90 и 150 *гц*. Благодаря особому способу питания антенн величина этих выделенных приемником напряжений на различных направлениях раз-

лична. На фиг. 41,*а* показано, как изменяется относительная величина напряжений 90 и 150 *гц* на различных направлениях в горизонтальной плоскости. Сплошная кривая соответствует частоте модуляции 90 *гц*, пунктирная — частоте модуляции 150 *гц*. Из фиг. 41,*а* видно, что в направлении *А—А* напряжения обеих частот равны. При уклонении в ту или иную сторону от этого равносигнального направления напряжение соответствующей частоты будет преобладать.



Фиг. 40. Порядок захода самолета на слепую посадку.

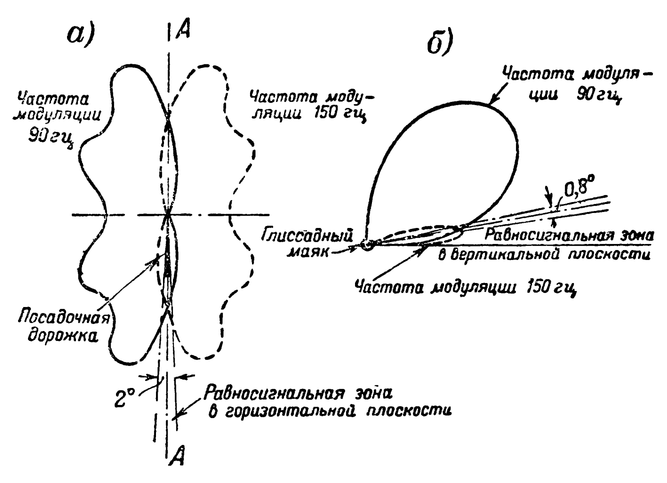
Практически наблюдается не равносигнальное направление, а равносигнальная зона. Для курсового радиомаяка ширина равносигнальной зоны составляет приблизительно 2°. Антенны радиомаяка располагаются так, чтобы направление равносигнальной зоны совпадало с направлением взлетно-посадочной полосы. Дальность действия такого радиомаяка около 40 *км*. Диапазон волн метровый.

Глиссадный радиомаяк создает равносигнальную зону в вертикальной плоскости. Направление этой равносигнальной зоны соответствует траектории снижения самолета. Способ получения равносигнальной зоны принципиально не отличается от того, который применяется в курсовом радиомаяке. На фиг. 41,*б* представлена диаграмма, на которой показано, как изменяется относительная величина напряжений 90 и 150 *гц* для различных направлений в вертикальной

плоскости. Ширина равносигнальной зоны глиссадного маяка составляет 0,8°. Дальность действия около 25 *км.* Длина волны берется меньше, чем в курсовом радиомаяке.

Глиссадный радиомаяк устанавливается несколько в стороне от ВПП, для того чтобы не мешать приземлению самолета.

Три маркерных радиомаяка служат для фиксирования момента пролета самолета над точками, отстоящими от на-

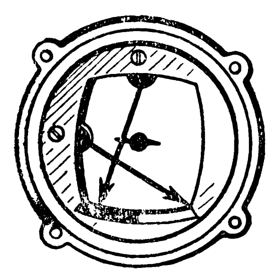


Фиг. 41. Образование равносигнальных зон.

чала ВПП на известных расстояниях. Маркерные маяки устанавливаются вдоль направления ВПП со стороны посадки. Излучение этих маяков направлено вверх и концентрируется в сравнительно узком конусе. В момент пролета маркерного маяка на самолете загорается сигнальная лампочка. Маркерные маяки работают также на метровых волнах и имеют дальность действия около 1 000 *м*. Располагаются они на расстоянии: 5—7 *км* от границы аэродрома; 1—2 *км* от границы аэродрома и на самой границе аэродрома. Для приема сигналов курсового, глиссадного и маркерных радиомаяков на самолете имеются три специальных приемника. Выходы курсового и глиссадного приемников подводятся к двум стрелочным приборам, смонтированным в одном корпусе. Две стрелки этого комбинированного индикатора — вертикальная и горизонтальная (фиг. 42) — реагируют соответственно на уклонение самолета влево или вправо от

направления ВПП и вверх или вниз при уклонении от нормальной глиссады планирования.

Заход самолета на слепую посадку производится следующим образом. С помощью обычного приводного радиомаяка и радиокомпаса самолет выводится в район аэродрома и летит так, чтобы пересечь равносигнальную зону в горизонтальной плоскости до посадочной дорожки (фиг. 40). Момент пролета равносигнальной зоны фиксируется вертикальной стрелкой двухстрелочного индикатора. Пользуясь показаниями этой стрелки, летчик ведет самолет вдоль посадочной дорожки по направлению к маркерным радиомаякам. Пролетев внешний маркерный маяк, самолет разворачивается на 180° и летит по направлению посадочной дорожки в сторону аэродрома. Пролетев внешний маркерный маяк на обратном пути, самолет должен иметь высоту 300—400 *м*. Обычно над маркерным маяком самолет пересекает равносигнальную зону в вертикальной плоскости (глиссаду планирования) и в дальнейшем снижается, руководствуясь только показаниями стрелок двухстрелочного индикатора. Если снижение самолета производится правильно, то одна из стрелок индикатора располагается вертикально, а другая — горизонтально. Над внутренним маркером самолет должен иметь высоту 15—20 *м*. Дальнейшее снижение и приземление производятся обычным путем, в условиях видимости аэродрома.



Фиг. 42. Двухстрелочный индикатор.

Подобная система слепой посадки еще более эффективна при использовании сантиметровых волн для курсового и глиссадного радиомаяков.

СЛЕПАЯ ПОСАДКА САМОЛЕТА С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Радиолокационная станция, как известно, позволяет определять положение самолета в пространстве независимо от условий погоды. Это обстоятельство позволяет непрерывно руководить с земли самолетом, если между самолетом и наземной радиолокационной станцией поддерживается радиотелефонная связь. Подобным же образом можно по данным радиолокационной станции руководить посадкой

самолета в условиях плохой видимости. Для этой цели на самолете не требуется никакой дополнительной радиоаппаратуры, кроме связной.

Одна из подобных систем слепой посадки работает следующим образом.

На аэродроме устанавливаются две радиолокационных станции: диспетчерская и посадочная. Диспетчерская станция представляет собой радиолокационную станцию кругового обзора, на индикаторах которой видны изображения самолетов, находящихся в воздухе в радиусе 50 *км*. Диспетчерская станция дает, таким образом, воздушную обстановку вокруг аэродрома.

Посадочная радиолокационная станция «просматривает» пространство в небольшом секторе в направлении посадки. По индикаторам этой станции можно определить направление на снижающийся самолет в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также определить расстояние до самолета. Заход на слепую посадку осуществляется в этом случае следующим образом.

Оператор наземной радиолокационой установки, наблюдая по индикаторам за самолетом, передает летчику по радио указание выходить на посадку. Во время приближения самолета к аэродрому летчик непрерывно получает от оператора дополнительные указания о том, как вести самолет. Когда самолет выходит на направление посадочной дорожки в зону действия посадочной станции, оператор в соответствующий момент дает команду снижаться и по индикаторам посадочной станции наблюдает за ходом посадки. Если снижающийся самолет отклоняется от направления на ВПП или от нормальной глиссады планирования, то оператор немедленно сообщает летчику величину отклонений самолета и расстояние до аэродрома. После того как самолет снизится до высоты 20—25 *м*, оператор разрешает самолету приземлиться. Приземление самолета производится летчиком самостоятельно, так как на этой высоте посадочная дорожка обычно хорошо видна. Для подсвета аэродрома имеется специальное световое оборудование.

Кроме описанной системы слепой посадки, существует ряд других систем, в которых процесс посадки автоматизирован. В таких системах наземные радиолокационные станции воздействуют соответствующим образом на рули управления самолета и позволяют производить приземление без участия летчика.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕВИДЕНИЯ В РАДИОНАВИГАЦИИ

В последнее время делаются попытки создать в авиации широкую радионавигационную систему, позволяющую решить ряд задач навигации, а именно: полет по определенному маршруту, выход в район аэродрома, предупреждение о возможном столкновении самолетов, слепая посадка и т. п. Основную роль в такой системе играет телевизионная и радиолокационная аппаратура.

Наблюдения за самолетами в радиусе около 100 *км* ведет наземная радиолокационная станция кругового обзора. На экране этой станции самолеты изображаются в виде небольших капель, расположенных в разных направлениях, расстояние которых от центра соответствует расстоянию до соответствующих самолетов. Для более наглядного изображения на экран накладывается карта местности, так что отметки самолета оказываются нанесенными как бы непосредственно на картах. На этой карте можно также нанести некоторые необходимые для экипажа сведения.

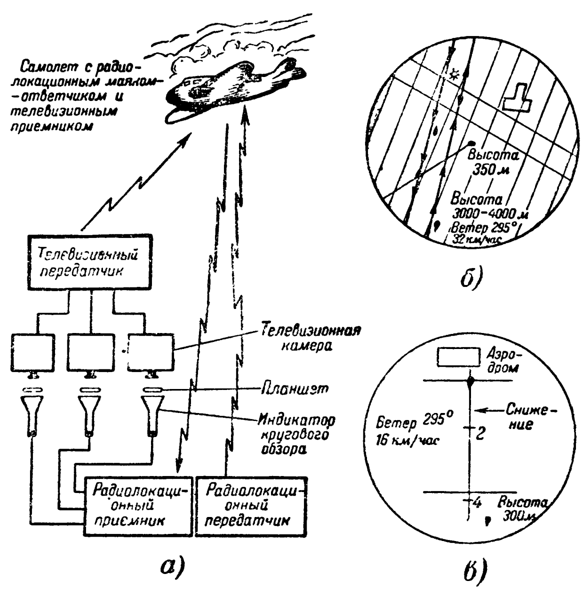
Перед полученным изображением устанавливается телевизионная камера, и с помощью телевизионного радиопередатчика изображение передается на самолет.

На самолете имеется телевизионный приемник. Летчик получает возможность наблюдать на экране за движением самолета, видеть препятствия, получать метеосводку или другие данные и т. д.

Обычно летчика интересуют лишь те самолеты, которые летят примерно на той же высоте, что и его самолет. Для этого необходимо разделить отраженные импульсы радиолокационной станции от самолетов, летящих в разных слоях по высоте. В одной из систем на самолете, кроме телевизионного приемника, устанавливается специальный ответчик, дающий в ответ на запросный импульс с земли ответный сигнал, зависящий от высоты полета. Этот ответчик связан с самолетным высотомером. Пользуясь ответным сигналом, на земле можно произвести отсортировку импульсов и подавать отраженные импульсы, соответствующие слоям высоты, на различные индикаторы кругового обзора. Основные элементы подобной телевизионно-радиолокационной системы изображены на фиг. 43,*а*.

Кроме указанного оборудования, необходимо еще иметь специальную радиолокационную станцию с дальностью око-

ло 30 *км* для управления движением в районе аэродрома и комплект радиолокационной аппаратуры слепой посадки. Такая аппаратура позволяет пилоту получить на экране картину, непрерывно указывающую положение самолета относительно взлетно-посадочной полосы, курс и высоту его, а также положение относительно самолетов, идущих на посадку впереди и позади.



Фиг. 43. Телевизионно-радиолокационная система.

На фиг. 43,*б* и *в* представлены телевизионные картины, принимаемые пилотом на самолете. На фиг. 43,*б* дано изображение для самолета, следующего по маршруту. Изображения самолетов на экране имеют вид каплевидных пятен. На экране отмечены также необходимые сведения: высота слоя, ветер, скорость, положение воздушных трасс, посадочных площадок, и т. д. Что касается ряда параллельных линий, то они не относятся к телевизионному изображению, а нанесены на прозрачный диск, соединенный с гирокомпасом самолета, и служат для указания его курса. Пилот видит, таким образом, собственное положение, положение других самолетов, собственный курс, расположение воздушных трасс и т. д.

На фиг. 43,*в* дано изображение экрана для самолета, идущего на посадку. Здесь ясно видно положение самолета относительно аэродрома и ВПП (вертикальная линия). Для указания положения самолета относительно глиссады планирования появляется дополнительная горизонтальная линия, которая автоматически располагается над или под пятном, изображающим самолет, в зависимости от того, находится ли он выше или ниже глиссады. Например, на фиг. 43,*в* самолет, расположенный ближе к аэродрому, находится точно на глиссаде и в направлении посадочной дорожки. Дальний самолет находится ниже глиссады и правее посадочной дорожки.

Телевизионно-радиолокационная система весьма удобна для дальней навигации над сушей, особенно при полете самолетов по определенным трассам. Наземные установки должны быть при этом расположены на некоторых расстояниях друг от друга вдоль всей трассы.

Хотя наземное оборудование рассмотренной системы сложное и громоздкое, вес самолетного оборудования может быть не больше нескольких десятков килограммов. Такая система значительно упрощает навигацию и повышает безопасность перелетов.

ЛИТЕРАТУРА

Г. А. Бабай, Радио в самолетовождении, Воениздат, 1951 г.

Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности, Сборник статей под ред. Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси, Гостехиздат, 1945 г.

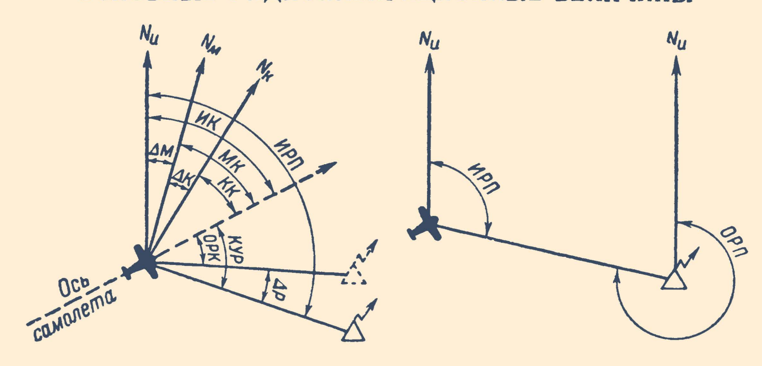
Е. Я. Щеголев, Радиоволны и их распространение, Гостехиздат, 1942 г.

Е. Я. Щеголев, Радионавигация, Гостехиздат, 1946 г.

В. В. Ширков, Расчет антенно-гониометрической системы пеленгаторов типа Эдкок, Воениздат, 1947 г.

Американские и английские радионавигационные системы, под ред. А. А. Танкова, Воениздат, 1948 г.

ОСНОВНЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

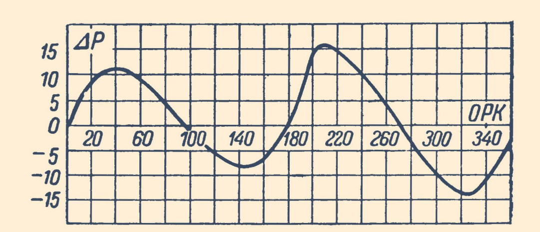


$N_и$ — направление истинного меридиана; $N_м$ — направление магнитного меридиана; $N_к$ — направление компасного меридиана; ΔM — магнитное склонение; ΔK — девиация магнитного компаса; *ИК* — истинный курс; *МК* — магнитный курс; *КК* — компасный курс; *КУР* — курсовой угол радиостанции; *ОРК* — отсчет радиокомпаса; ΔP — радиодевиация *ИРП* — истинный радиопеленг $(ИРП = КК + \Delta K + \Delta M + ОРК + \Delta P)$ *ОРП* — обратный радиопеленг $(ОРП = ИРП + 180°)$.

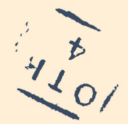
При учете схождения меридианов у полюсов $ОРП = ИРП + 180° + E$

$$E = (\lambda_p - \lambda_c) \cdot \sin \varphi_{cp},$$

где λ_p — долгота радиостанции; λ_c — долгота самолета и φ_{cp} — средняя широта для самолета или радиостанции.



Типовой график радиодевиации самолетного радиополукомпаса $КУР = ОРК + \Delta P$.



Цена 1 р. 80 к.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

под общей редакцией академика А. И. БЕРГА

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ И ПОСТУПИЛИ В ПРОДАЖУ

БАУМГАРТС В. Ф., Сельская радиопередвижка, стр. 40, ц. 1 р.

ГАНЗБУРГ М. Д., Трехламповый супергетеродин, стр. 32, ц. 80 к.

ДОЛЬНИК А. Г., Выпрямители с умножением напряжения, стр. 32, ц. 80 к.

ЕВДОКИМОВ П. И., Методы и системы многоканальной связи, стр. 64, ц. 1 р. 50 к.

КОМАРОВ А. В. и ЛЕВИТИН Е. А., Радиовещательные приемники „Москвич" и „Кама", стр. 12, ц. 90 к.

ЛЕВАНДОВСКИЙ Б. А., Шкалы и верньерные устройства, стр. 64, ц. 1 р. 50 к.

ЛЕВИТИН Е. А., Новое в изготовлении радиоаппаратуры, стр. 72, ц. 1 р. 70 к.

ТУТОРСКИЙ О. Г., Простейшие любительские передатчики и приемники УКВ, стр. 56, ц. 1 р. 25 к.

ПРОЗОРОВСКИЙ Ю. Н., Любительские коротковолновые радиостанции, стр. 56, ц. 1 р. 40 к.

РАХТЕЕНКО А. М., Карманные радиоприемники, стр. 16, ц. 40 к.

ШУМИХИН Ю. А., Введение в импульсную технику, стр. 112, ц. 2 р. 70 к.

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ КНИЖНЫХ МАГАЗИНАХ И КИОСКАХ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЗАКАЗОВ НЕ ВЫПОЛНЯЕТ